



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

GENERÁTOR BAREVNÝCH ŠUMŮ

COLOUR NOISE GENERATOR

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Tomáš Křivánek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Petr Frenštátský

BRNO 2016

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Teleinformatika**

Ústav telekomunikací

Student: Tomáš Křivánek

ID: 155188

Ročník: 3

Akademický rok: 2015/16

NÁZEV TÉMATU:

Generátor barevných šumů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Úkolem práce je seznámit se s barevnými šumy, jako jsou růžové, hnědé, azurové a další, a s jejich využitím pro měření v elektroakustice a zvukové technice. Cílem je navrhnout generátory a odpovídající filtry v prostředí MATLAB, jenž budou umožňovat dané šumy vytvářet.

V rámci práce se student seznámí se spektrálními vlastnostmi barevných šumů používaných pro měření v elektroakustice a zvukové technice a v prostředí Matlab navrhne algoritmy generování těchto signálů ve spektrální a časové oblasti bez využití funkcí toolboxů Matlabu. Výsledné signály porovná se signály generovanými profesionálními programy.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] SYSEL, P.; SMÉKAL, Z. Číslíkové filtry. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2012. s 1-148. ISBN 978-8-214-4454-6

[2] KATZ, B. Mastering Audio: The Art and the Science, 2nd edition. Focal Press, 2007. 336s. ISBN 978-0240808376

IEC 60268-1 ed2.0: Sound system equipment. Part 1: General. International Electrotechnical Commission, 1985.

Termín zadání: 1.2.2016

Termín odevzdání: 1.6.2016

Vedoucí práce: Ing. Petr Frenštátský

Konzultant bakalářské práce:

doc. Ing. Jiří Mišurec, CSc., předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Anotace:

Úkolem této bakalářské práce je seznámení s barevnými šumy, jako jsou růžové, hnědé, azurové a další. V práci jsou popsány barevné šumy a jejich využitím pro měření v elektroakustice a zvukové technice.

Praktická část této práce se zabývá generováním barevných šumů v prostředí Matlab, kde se především pracuje s modelovým kmitočtovým spektrem, frekvenční charakteristikou a FIR filtry.

Klíčová slova:

Barvy šumu, bílý šum, růžový šum, modrý šum, hnědý šum, modrý šum, generátor šumu, FIR filtr.

Abstract:

The main purpose of this bachelor thesis is explanation of „colored noise“, such as pink, brown, blue and more. There are completely subscribed coloured noises in this work, including their importance and use for measurement in electroacoustic and sound technology.

Practical part of this thesis is focused on generating colored noises in Matlab, where we mainly work with model frequency spekter, frequency response and FIR filters.

Keywords:

Colors noise, white noise, pink noise, blue noise, brown noise, generator noise, FIR filtres.

Bibliografická citace mé práce:

KŘIVÁNEK, T. *Generátor barevných šumů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016. 51 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Petr Frenštátský

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Generátor barevných šumů“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Petru Frenštátskému za odborné rady a za užitečné rady při zpracování bakalářské práce.

V Brně dne

.....
(podpis autora)

Výzkum popsáný v této bakalářské práci byl realizovaný v laboratořích podpořených projektem Centrum senzorických, informačních a komunikačních systémů (SIX); registrační číslo CZ.1.05/2.1.00/03.0072, operačního programu Výzkum a vývoj pro inovace.

OBSAH

Seznam obrázků	3
Seznam tabulek	5
Úvod	6
1 Signály – vybrané pojmy	7
1.1 Definice signálů	7
1.2 Náhodné signály	9
1.3 Charakteristiky náhodných signálů.....	10
1.3.1 Spektrální výkonová hustota.....	11
1.3.2 Autokorelační funkce.....	12
1.3.3 Další důležité charakteristiky.....	13
1.4 Definice šumu	14
1.4.1 Barevné označení.....	15
2 Barvy šumu	17
2.1 Bílý šum.....	17
2.2 Růžový šum	20
2.3 Modrý šum.....	22
2.4 Černý šum	24
2.5 Hnědý šum	24
2.6 Šedý šum.....	24
2.7 Fialový šum.....	25
2.8 Oranžový šum	25
2.9 Zelený šum.....	25
3 Praktická část	26
3.1 Generování pomocí funkce <code>dps.ColoredNoise</code>	26
3.2 Generování pomocí násobení frekvenční charakteristiky.....	27
3.3 Filtrace bílého šumu pomocí filtru FIR	31
3.4 Porovnání výsledků.....	33
4 Závěr	40

Literatura	41
Seznam symbolů, veličin a zkratk	43
Seznam příloh	44

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1:	Modul a argument spektrální funkce jednotkového impulsu [1].	8
Obr. 2:	Souvislost mezi spektrální výkonovou hustotou a celkovým výkonem signálu.	12
Obr. 3:	Porovnání průběhů náhodných signálů (a) a jejich korelačních funkcí (b) a spekter (c) [2].	13
Obr. 4:	Rozklad bílého světla optickým hranolem [zdroj: http://polar-peza.euweb.cz/zpusoby_polarizace.html].	15
Obr. 5:	Autokorelační funkce bílého šumu – spojitý a diskrétní proces [15].	18
Obr. 6:	Spektrum bílého šumu [zdroj: http://www.thespiritresearchsociety.com].	18
Obr. 7:	Průběh bílého šumu s rovnoměrným a normálním rozdělením [15].	19
Obr. 8:	Bílý šum v obrazové formě [zdroj: youtube.com].	19
Obr. 9:	Růžový šum generovaný pomocí knihoven matlabu.	20
Obr. 10:	Schéma zapojení generátoru růžového šumu [17].	21
Obr. 11:	Obrazová podoba růžového šumu [zdroj: youtube.com].	22
Obr. 12:	Modrý šum generovaný pomocí knihoven matlabu.	22
Obr. 13:	Vliv modrého šumu v obraze [19].	23
Obr. 14:	Čerenkovovo záření [21].	23
Obr. 15:	Spektrální výkonová hustota šedého šumu [zdroj: en.wikipedia.org].	25
Obr. 16:	Růžový šum vygenerován pomocí funkce <code>dsp.ColoredNoise</code> .	27
Obr. 17:	Bílý šum vygenerován pomocí $x = \sigma * \text{randn}(L, 1) + \mu$.	28
Obr. 18:	Bílý šum po FFT.	28
Obr. 19:	Modulové kmitočtové spektrum.	29
Obr. 20:	Modulové kmitočtové spektrum po odmocnění.	29
Obr. 21:	Růžový šum generován násobením frekvenční charakteristiky.	30
Obr. 22:	Růžový šum generován pomocí FIR filtru.	32
Obr. 23:	Závislost výkonové spektrální hustoty růžového šumu na délce FIR filtru.	33
Obr. 24:	Příklad třetinooktávového pásma.	34
Obr. 25:	Srovnání výkonových spektrálních hustot růžového šumu generované příslušnými metodami (řád FIR filtru 170).	35

Obr. 26:	Srovnání výkonových spektrálních hustot modrého šumu generované příslušnými metodami (řád FIR filtru 140).....	36
Obr. 27:	Srovnání výkonových spektrálních hustot hnědého šumu generované příslušnými metodami (řád FIR filtru 500).....	37
Obr. 28:	Srovnání výkonových spektrálních hustot fialového šumu generované příslušnými metodami (řád FIR filtru 100).....	38

SEZNAM TABULEK

Tab. 1:	Srovnání metod generování růžového šumu.....	35
Tab. 2:	Srovnání metod generování modrého šumu.	36
Tab. 3:	Srovnání metod generování hnědého šumu.	37
Tab. 4:	Srovnání metod generování fialového šumu.	38

ÚVOD

Lidé jsou obklopeni rozličnými zvuky všude okolo, ať už venku na rušné ulici, kde jsou slyšet zejména dopravní prostředky, v kanceláři, kde je často slyšet tlukot do klávesnice nebo hovory mezi lidmi, či doma, kde jsou v provozu různé domácí spotřebiče produkující hluk. Nezřídka jsou tyto zvuky velmi monotónní. Pokud se konkrétně do zvuku spotřebičů člověk pořádně zaposlouchá, je schopen i bez hlubších znalostí rozeznat velmi jednotvárný hluk, který lze označit za šum. Že je tomu skutečně tak, ukážu v této práci.

Nejdříve v kapitole 1 uvedu vybrané důležité pojmy týkající se jak obecných signálů a jejich vlastností, tak i náhodných signálů se zaměřením na šum. Následující kapitola 2 se bude věnovat bližšímu odbornému popisu jednotlivých druhů šumů rozlišených podle barvy. Co to přesně znamená, ozřejmí další text. Protože z hlediska měření a elektroakustiky jsou podstatné zejména kmitočtové vlastnosti jednotlivých šumů, kladu si v této práci za cíl, objasnit rozdíly v tomto oboru u všech zmíněných druhů šumů.

1 SIGNÁLY – VYBRANÉ POJMY

Elektroakustika se zabývá šířením zvuku či jeho záznamem za použití elektrického proudu. Souvisí tedy se zvukovou technikou, elektronikou, ale pochopitelně i se samotnou akustikou. Ve velké většině technických odvětví je klíčová znalost signálů a elektroakustika není výjimkou. K pochopení problematiky šumů, kterou se bude tato práce v dalších kapitolách zabývat, bude naprosto nezbytné nejprve uvést a vysvětlit některé termíny, které jsou se šumem úzce spjatý.

V kapitole 1.1 jsem popsal základní pojmy související se signálem – jeho definici, základní rozdělení, přičemž v navazující kapitole 1.2 jsem se zaměřil přímo na náhodné signály a jejich vlastnosti. V kapitole 1.3 a v souvisejících podkapitolách jsem potom uvedl různé charakteristiky, kterými lze náhodné signály popsat. Zaměřil jsem se ale především na ty nejdůležitější – spektrální výkonovou hustotu a autokorelační funkci. Pochopení právě těchto dvou charakteristik je důležité pro navazující kapitolu 2. Následně jsem v kapitole 1.4 čtenáře seznámil s problematikou šumu a jeho barevného rozlišení.

1.1 Definice signálů

V různých oborech je možné chápat signál rozličnými způsoby. Z fyzikálního hlediska je signál veličina nesoucí informaci. Může to být řeč, ale i elektrický proud či napětí. Signály nemívají pravidelný průběh, není tedy často právě předvídatelný [1]. Signály lze rozdělit podle více vlastností, G. Čepčiansky a M. Vaculík ze Žilinské univerzity uvádějí ve své publikaci následující [2]:

- nenáhodné (deterministické) – náhodné (stochastické),
- neustálené (nestabilní) – ustálené (stabilní),
- jednorázové (impulzní) – periodické – neperiodické,
- se spojitým časem – s diskrétním časem,
- amplitudově spojitě – amplitudově diskrétní,

přičemž kombinace z jednotlivých oddílů není vyloučena (je možné mít náhodný signál se spojitým časem nebo signál s diskrétním časem, ale spojitou amplitudou) [1]. Nejpodstatnější je rozdělení na náhodné a nenáhodné signály, jelikož způsoby, jak tyto jednotlivé skupiny lze popsat, se značně liší, což podrobněji rozeberu v dalším textu.

Zobrazení signálu v kmitočtové oblasti je nazýváno jako **spektrum** signálu a existuje celá řada různých typů. Spektrum je komplexní funkce reálné proměnné (kmitočtu), proto se používají pojmy reálná a imaginární část spektra, amplitudové a fázové spektrum (vychází z polárního tvaru komplexních čísel). Jednostranné spektrum je definováno pouze pro kladné frekvence, pokud je definováno pro kladné i záporné kmitočty, jedná se o dvoustranné spektrum, které se v teoretických úvahách nachází častěji. Vychází z Fourierovy transformace nebo komplexní Fourierovy řady. Jednostranné spektrum lze získat například měřením výkonu signálu na jednotlivých frekvencích za použití filtrace, tedy bez aplikace Fourierovy transformace. Fourierova transformace slouží k tomu, aby se signál převedl z časové oblasti do kmitočtové [1][3].

Se spektrem souvisí také pár dalších termínů. Například **spektrální funkce** $S(\omega)$, pod kterou si lze představit Fourierův obraz obecného neperiodického signálu $s(t)$ se spojitým spektrem. Je možné ji stanovit následovně [1]:

$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) \exp(-j\omega t) dt, \quad (1.1)$$

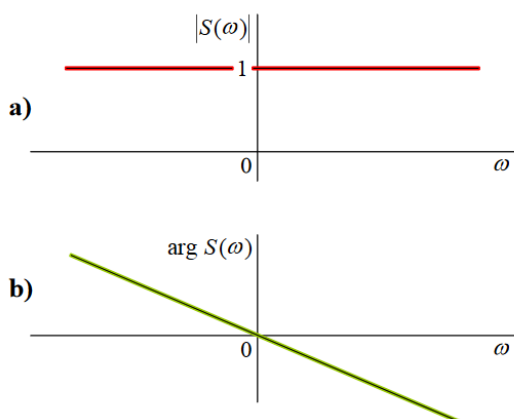
kde ω představuje úhlový kmitočet. Jak je patrné ze vzorce 1.1, spektrální funkce má tvar komplexního čísla a je tedy možné ji přepsat jako reálnou část $R(\omega)$ funkce [1]:

$$R(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) \cos \omega t dt, \quad (1.2)$$

a imaginární část $X(\omega)$ [1]:

$$X(\omega) = - \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) \sin \omega t dt. \quad (1.3)$$

Je zřejmé, že platí: $R(\omega) = R(-\omega)$ a $X(-\omega) = -X(\omega)$. Proto jsou funkce $S(\omega)$ a $S(-\omega)$ komplexně sdružené. Na obr. 1 je příklad spektrální funkce – přesněji řečeno její modul a argument. V tomto případě jde o jednotkový impuls, který si lze představit jako velmi vysoký a velmi úzký obdélníkový impuls [1].



Obr. 1: Modul a argument spektrální funkce jednotkového impulsu [1].

Další související termín je **spektrální hustota**. Ta popisuje rozdělení hustoty energie nebo hustoty výkonu signálu ve frekvenci. Často se lze setkat také s pojmem **výkonové spektrum**. Bohužel neexistuje obecná shoda na tom, pro které spektrum (diskrétní nebo spojitě) jakého signálu (deterministického či náhodného) používat termín spektrální hustota a kdy výkonové spektrum, v různých odborných pramenech se lze setkat s odlišným vysvětlením. K výkonovému spektru se vrátím ještě v kapitole 1.3.1. V této práci bude pojem spektrální hustota používán pro všechny typy signálů a spekter, ovšem je důležité si uvědomit, že pro náhodné a nenáhodné signály je určována jinak.

Pokud budeme chtít určit spektrum nebo spektrální hustotu signálů, přistoupíme ke **spektrální analýze**, což je celá skupina rozličných postupů. Jejich základem jsou ortogonální transformace, díky nimž je možné přiřadit časovému průběhu signálu jeho

spektrum a obráceně. Toto vzájemné jednoznačné přiřazování je ale možné pouze u deterministických signálů. U náhodných signálů je informace o fázi ztracena a toto přiřazení tedy není možné jednoznačně provést [3]. Podrobnosti v navazující kapitole 1.2.

Nenáhodné signály lze v časové oblasti popsat analytickými funkcemi a ve frekvenční oblasti spektrem, které bývá vyjádřeno pomocí Fourierovy transformace. Naproti tomu náhodné signály jsou popsány metodami založenými na teorii pravděpodobnosti, teorii náhodných procesů a na matematické statistice. V časové oblasti lze popsat autokorelační funkcí a ve frekvenční oblasti pomocí spektrální výkonové hustoty [2]. Pro tuto práci budou stěžejní právě náhodné signály se spojitým časem, jak vyplývá z dalšího textu, čili bude vhodné, abych se zaměřil výhradně na ně.

1.2 Náhodné signály

Pokud průběh signálu nelze popsat matematickým výrazem, jsou jeho hodnoty náhodné. Obvykle je signál ovlivněn nějakým jevem, na který vplývají náhodné podmínky a okolnosti při jeho vzniku. Případně mohou být nenáhodné signály rušeny šumem, který náhodný je. Z toho plyne, že při každém pozorování získáme jiný časový průběh (jinou realizaci náhodného procesu). Náhodný signál je vyjádřen náhodnou funkcí, která je odvozena od náhodné proměnné. Náhodný signál $X(t)$ je možné definovat následujícím způsobem [2][3]:

$$X(t) = C * f(t), \quad (1.4)$$

kde C je náhodná amplituda, $f(t)$ je analytická funkce, přičemž čas t může nabývat hodnot v rozsahu $(-\infty, 1)$. Náhodný signál je možné popsat buď pravděpodobnostními, nebo statistickými metodami.

U pravděpodobnostních metod přistupujeme k hodnotám signálu jako k soustavě náhodných proměnných (například funkce hustoty rozdělení pravděpodobnosti). U statistických je průběh signálu popsán charakteristikami, které jsou určovány z časového průběhu signálu. Nejčastěji jde o střední hodnotu, střední kvadratickou hodnotu, rozptyl, autokorelační funkci a spektrální výkonovou hustotu (ta je technicky vzato určována ve frekvenční oblasti, ale stále platí, že jde o statistickou charakteristiku).

Pokud bude mít náhodná funkce jako nezávisle proměnnou čas, jde o **náhodný proces** (podrobnosti v kapitole 1.3.3). K jeho popisu nelze použít pravděpodobnostní rozdělení z důvodu přílišné obtížnosti, a proto bývá popsán pouze číselnými statistickými charakteristikami (často to bývají řečové, seismické či radarové signály). Pokud by náhodný proces splňoval podmínky **ergodicity**, bylo by možné jej popsat trochu jednodušeji. Proces je ergodický ve chvíli, kdy je ustálený, jeho korelační funkce se blíží nule a všechny jeho realizace mají stejné statistické vlastnosti, stejné chování. Je potom možné, je popsat distribuční funkcí nebo funkcí hustoty rozdělení pravděpodobnosti. Těmto kritériím vyhovují především elektrické signály používané k přenosu informací. Pokud totiž elektrický signál vykazuje chování náhodného procesu, může být nositelem informace [1][2][3].

Dalším pojmem hojně užívaným v souvislosti se signály je **stacionarita**. Stacionární procesy jsou takové, jejichž charakteristiky nejsou závislé na volbě počátečního časového okamžiku. To znamená, že jsou časově invariantní. Náhodný signál lze považovat za stacionární ve chvíli, když jeho rozdělení hustoty pravděpodobnosti bude nezávislé na volbě počátku časové osy [3].

K dynamickému popisu náhodných signálů se využívá nejčastěji **spektrální výkonová hustota** (spektrální hustota výkonu, *PSD - Power Spectral Density*) pro charakteristiky ve frekvenční oblasti nebo **autokorelační funkce** pro charakteristiky v časové oblasti. Z autokorelační funkce se lze provedením Fourierovy transformace propočítat k PSD. Ovšem dojde tak ke ztrátě informace o fázi signálu a proto vzájemné přiřazení mezi náhodným signálem a spektrální hustotou není jednoznačně možné [3].

V praxi však často hodnoty charakteristik nelze přesně určit. Je to dáno tím, že získáme jedinou realizaci náhodného procesu, navíc konečné délky, ale charakteristiky jsou definovány pro množinu realizací a nekonečně dlouhé pozorovací intervaly. Potom se tyto charakteristiky chovají jako náhodné proměnné a provádí se jejich odhad. Bohužel právě odhadem charakteristik dochází k další ztrátě informace [1][3]. O charakteristikách bude možné se dočíst více v kapitole 1.3.

Je tedy zjevné, že spektrální analýza náhodných signálů nemusí být vždy tak jednoznačná. Často je nezbytné analyzovat signál více metodami a teprve při porovnání všech dosažených výsledků je možné učinit závěry. Nejednoznačnost do spektrální analýzy přináší nejenom povaha náhodného signálu, ale i výběr metody. Existují klasické metody založené na Fourierově transformaci, parametrické metody založené na popisu signálů souborem parametrů či neparametrické metody [3].

1.3 Charakteristiky náhodných signálů

Obecně lze charakteristiky podle způsobu určování rozdělit na:

- teoretické (pravděpodobnostní),
- empirické (časové),
- odhady charakteristik.

Při určování teoretických charakteristik je vyžadován úplný soubor a nejlépe s nekonečným počtem realizací náhodného procesu. Jde o nenáhodné veličiny (představují vždy číslo nebo deterministicky vyjádřenou funkci) a tyto charakteristiky se používají pro teoretické rozbory.

Pokud je k dispozici jediná realizace, která je nekonečně dlouhá, a musíme určit teoretickou charakteristiku náhodného signálu, použijeme empirickou charakteristiku. Je zjevné, že pokud jsou empirické charakteristiky určovány z jediné realizace, potom musí být náhodné, bez ohledu na nekonečně dlouhý pozorovací interval. Z nepochopení dané situace často plynou chyby při spektrální analýze.

Kdybychom chtěli zpracovávat signál v praxi, vždy bude konečné délky. Proto u náhodných signálů se statistické charakteristiky pouze odhadují. Tyto odhady jsou náhodné veličiny a jejich přesnost je ovlivněna mnoha faktory. Odhadovat lze buď z jediné realizace anebo i z více realizací naměřených dat.

Zpět tedy k teoretickým charakteristikám. Pro náhodné procesy jsou určovány ve zvolený časový okamžik ze všech realizací souboru, tzn. na množině realizací. Jelikož je náhodný proces popisován coby náhodná veličina v určitém časovém okamžiku, lze hovořit o pravděpodobnostním přístupu. Mezi nejčastější teoretické charakteristiky patří: střední hodnota, rozptyl, střední kvadratická hodnota, autokorelační funkce, autokovarianční funkce, vzájemná korelační funkce a vzájemná kovarianční funkce. Existují ještě i další jako jsou spektrální výkonová hustota, vzájemná spektrální hustota či koherenční funkce. Všechny lze získat Fourierovou transformací z korelační či vzájemné korelační funkce [3].

U ergodických procesů, které byly zmíněny již v kapitole 1.2, lze teoretické charakteristiky nahradit empirickými (s nulovým rozptylem). Pokud by proces splňoval zároveň podmínky ergodicity i stacionarity, bylo by možné teoretické charakteristiky určované napříč souborem, nahradit empirickými počítanými „podél času“ z jediné realizace. V praxi se toho často využívá, jelikož se běžně stává, že je k dispozici jediná realizace náhodného procesu.

Pokud by se empirické charakteristiky měly porovnávat s teoretickými, musela by se vzhledem k jejich náhodnosti použít střední hodnota. Pro ergodické signály je libovolná empirická charakteristika (případně její střední hodnota) rovna hodnotě odpovídající teoretické charakteristiky.

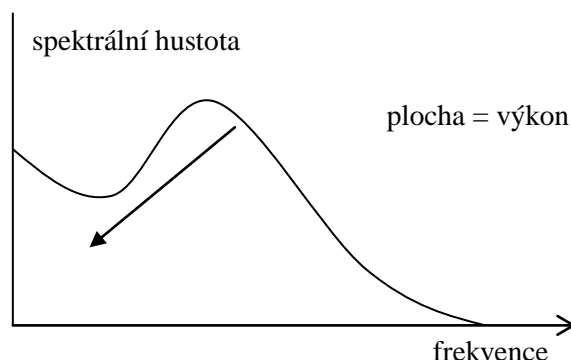
Co se týče odhadu charakteristik, ten je prováděn tak, že nejprve se definuje teoretická charakteristika, následně je proveden odhad ze souboru realizací, poté odhad z jediné realizace (nestacionárního či stacionárního procesu), a následně může být diskutována přesnost odhadu a jeho vlastnosti [3].

1.3.1 Spektrální výkonová hustota

Pod spektrální výkonovou hustotou si lze jednoduše představit rozložení výkonu signálu podél frekvenční osy, čímž je vidět, které pásmo je nejvýkonnější. To platí pro stacionární signály, pro nestacionární se sleduje rozložení výkonu signálu navíc i podél časové osy. Spektrální výkonovou hustotu $S_{xx}(\omega)$, je možné definovat pomocí středního výkonu P připadajícího na pásmo úhlových kmitočtů $< \omega_1; \omega_2 >$ [1]:

$$P = \int_{\omega_1}^{\omega_2} S_{xx}(\omega) d\omega = 2 \int_{\omega_1}^{\omega_2} S_{xx}(\omega) d\omega, \quad (1.5)$$

kdy zároveň platí: $0 < \omega_1 < \omega_2$. Jednotkou výkonové spektrální hustoty používající obvyčejné kmitočty místo úhlových frekvencí bude W/Hz. Ovšem existuje také možnost kvůli velké dynamice spekter používat logaritmické měřítko a potom je jednotkou decibel [dB]. Kromě spektrální výkonové hustoty se někdy uvádí i **jednostranná spektrální výkonová hustota** $G(\omega)$. Vzorec pro výpočet celkového výkonu z jednostranné PSD by byl podobný, ale určitý integrál by byl definován pouze pro kladné kmitočty. Jednostranná spektrální výkonová hustota $G(\omega)$ je základem pro měření spektrálních vlastností signálu pomocí filtrace – ať už digitální nebo analogové, dvoustranná spektrální výkonová hustota $S_{xx}(\omega)$ souvisí s Fourierovou transformací a využívá se k měření spektra čistě digitálním způsobem [1][3][4]. Na obr. 2 je vidět, jak spektrální výkonová hustota souvisí s celkovým výkonem signálu [3].



Obr. 2: Souvislost mezi spektrální výkonovou hustotou a celkovým výkonem signálu.

Často se ve spojitosti s výkonovou spektrální hustotou objevuje i termín **výkonové spektrum**, který byl zmíněn již v kapitole 1.1. Sice se v jeho definici literatura rozchází, ale často se uvádí následující spojitost: zatímco výkonové spektrum je striktně definováno Fourierovou transformací lineárního spektra, PSD je možné definovat i bez ní. Výkonové spektrum je možné uvažovat pro jakoukoliv funkci, výkonovou spektrální hustotu zpravidla jen pro náhodné signály.

V praxi se běžně provádí odhad PSD. Slouží k tomu tzv. periodogramy. Periodogram je funkcí úhlové frekvence či frekvence (v Hz) od $-\infty$ do $+\infty$. Výkonová spektrální hustota odvozená od periodogramu je oboustranným spektrem, tzn. obsahuje složky s kladnými i zápornými kmitočty. Kromě periodogramu využívajícího FT lze odhad provést i v Matlabu, kde jsou již předprogramované funkce k tomu určené [1][5].

1.3.2 Autokorelační funkce

Korelace (korelační funkce) dvou signálů určuje jejich závislost, tzn. pokud jsou v korelaci, jsou na sobě závislé. Autokorelační funkce je korelační funkce náhodného procesu hodnoceného ve dvou časových okamžicích. Má odhalit periodicitu zašuměných signálů, pro které bude mít periodický průběh se silnými lokálními maximy. Obecně je možné autokorelační funkci definovat následovně [3][6]:

$$R_{xx}(\tau) = E\{x(t) x(t + \tau)\}, \quad (1.6)$$

kde $E\{\}$ znamená operátor veličiny uvnitř závorek. Lze jím definovat i další charakteristiky náhodných signálů. Navíc je možné nalézt vztah mezi autokorelační funkcí a spektrální výkonovou hustotou. Pokud totiž na autokorelační funkci $R_{xx}(\tau)$ bude aplikována Fourierova transformace, výsledkem bude spektrální výkonová hustota $S_{xx}(\omega)$. Slouží k tomu tzv. Wiener-Chinčinovy vzorce [6][7]:

$$S_{xx}(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} R_{xx}(\tau) \exp(-j\omega\tau) d\tau, \quad (1.7)$$

$$R_{xx}(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} S_{xx}(\omega) \exp(j\omega\tau) d\omega. \quad (1.8)$$

Pokud by autokorelační funkce byla v počátku – muselo by tedy platit, že $\tau = 0$,

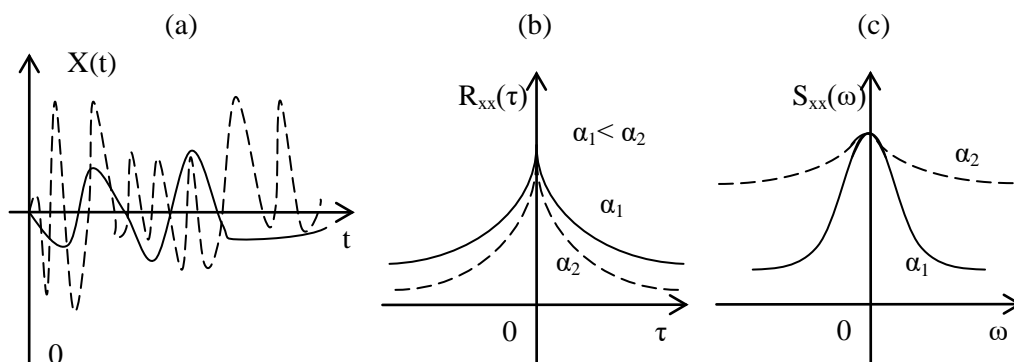
představovala by celkový výkon signálu [7]:

$$R_{xx}(0) = \int_{-\infty}^{+\infty} S_{xx}(f) df, \quad (1.9)$$

přičemž namísto úhlové frekvence ω lze vzorec psát i s frekvencí f , jelikož platí:

$$\omega = 2\pi f. \quad (1.10)$$

Jak ukazuje Obr. 3, lze najít určitou souvislost mezi charakterem náhodného signálu (a), jeho korelační funkcí (b) a spektrem (c). Větší koeficient α znamená rychlejší zánik autokorelační funkce a značí menší spojitost mezi jednotlivými hodnotami náhodného signálu a naopak. Pro spektrální výkonovou hustotu platí opačná závislost – čím menší souvislost mezi jednotlivými hodnotami náhodného signálu, tím je frekvenční spektrum širší. Existuje ale jedna výjimka – bílý šum. V jeho případě neexistuje vůbec žádná spojitost mezi jednotlivými hodnotami a průběhy jak autokorelační funkce, tak výkonové spektrální hustoty [2].



Obr. 3: Porovnání průběhů náhodných signálů (a) a jejich korelačních funkcí (b) a spekter (c) [2].

1.3.3 Další důležité charakteristiky

Náhodný proces tvořený náhodnými veličinami lze ještě popsat **distribuční funkcí a funkcí hustoty rozdělení pravděpodobnosti**. Hustota rozdělení pravděpodobnosti slouží především k získání informací o rozdělení četností okamžitých hodnot. Je možné tímto způsobem například ověřovat periodicitu signálů nebo vyhodnocovat přesnost odhadu úrovně šumu v signálu. Ke grafickému znázornění slouží histogramy rozdělení četností [3]. Jednorozměrnou distribuční funkci $F(x, t)$ lze definovat jako [8]:

$$F(x, t) = P\{X(t) \leq x\}, \quad (1.11)$$

přičemž pod $X(t)$ se skrývá náhodný proces. Distribuční funkce tak vyjadřuje pravděpodobnost, že náhodný proces v daném časovém okamžiku t bude menší nebo roven x . Z jednorozměrné distribuční funkce lze dále určit jednorozměrnou hustotu rozdělení pravděpodobnosti $f(x, t)$ [8]:

$$f(x, t) = \frac{\partial F(x, t)}{\partial x}. \quad (1.12)$$

Tyto charakteristiky popisují náhodný proces pouze v jediném časovém okamžiku t . Pro získání představy o vývoji náhodného procesu v čase jsou vhodnější dvojrozměrné charakteristiky. Například dvojrozměrnou distribuční funkci lze definovat jako [8]:

$$F(x_1, t_1; x_2, t_2) = P\{x(t_1) \leq x_1; x(t_2) \leq x_2\}, \quad (1.13)$$

a velmi obdobně by se dala definovat dvojrozměrná hustota pravděpodobnosti [8]:

$$f(x_1, t_1; x_2, t_2) = \frac{\partial^2 F(x_1, t_1; x_2, t_2)}{\partial x_1 \partial x_2}. \quad (1.13)$$

Rozdělení pravděpodobnosti je možné určit také číselnými charakteristikami – momenty. Nejběžnější bývá **střední hodnota** $a(t)$, což je obecný moment prvního řádu [8]:

$$a(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} x f(x, t) dx, \quad (1.14)$$

přičemž ze vzorce je zřejmé, že pokud by každá možná hodnota x byla násobena hustotou rozdělení pravděpodobnosti $f(x, t)$ a všechny tyto příspěvky by byly sečteny, jejich součet by se rovnal průměrné hodnotě, která bývá označována jako střední hodnota [3]. **Rozptyl (disperze)** $D(t)$ je pro změnu nejdůležitější centrální moment druhého řádu. Centrální moment je takový, jehož střední hodnota je rovna nule [8]:

$$D(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} [x - a(t)]^2 f(x, t) dx. \quad (1.15)$$

Mezi smíšené momenty druhého řádu lze zařadit i korelační a kovarianční funkce, které by byly tím pádem definovány pro dva časové okamžiky. Pomocí nich lze lépe vystihnout vnitřní stav náhodných procesů [8].

1.4 Definice šumu

Se signály je velmi úzce svázán termín **šum**, jehož zkoumání je cílem bakalářské práce. Na šum lze podobně jako na signály nahlížet z více hledisek. Obecně se tím může rozumět hlasitý rušivý zvuk, lze ho ale najít i v obraze – říká se mu často také zrnění (například při přeladování TV stanic na přijímači). V terminologii počítačů zase šum představuje nesrozumitelná irelevantní data. Z fyzikálního hlediska je to hlavně náhodná a přetrvávající porucha signálu, která snižuje jeho jasnost, či jej překrývá. Všechny tyto definice ale mají něco společného – vždy šum představuje nežádoucí jev, který do signálu vnáší prvek náhodnosti.

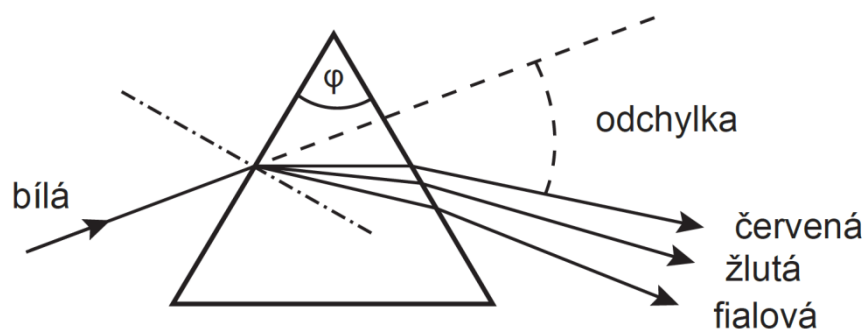
Je velmi důležité jej znát, jelikož může působit mnoho technických problémů ať už v mobilních sítích nebo třeba u ultrazvukových přístrojů. Šum je tedy časová řada mnoha frekvenčních složek a ve své podstatě jde o náhodný signál. Lze tím pádem říci,

že šum je náhodný signál (proces) se spojitým časem, ostatně proto byla vlastnostem náhodných signálů věnována velká část předchozí kapitoly [1][5][9][10].

Podle Rane corporation, což je firma zabývající se od roku 1981 audio technikou, stanovuje slovníček telekomunikačních pojmů Federálního telekomunikačního standardu 1037C čtyři barvy šumu - bílou, růžovou, modrou a černou. Tento standard je oficiálně uznávaným při definici zmiňovaných druhů šumů. Existují však i další šumy, pro které se vžila jiná barevná označení, ale s tím rozdílem, že pro ně neexistuje oficiální standard, který by je popisoval [9].

1.4.1 Barevné označení

Nyní se nabízí otázka, proč jsou jednotlivé šumy pojmenovány podle barev? Kdybychom totiž vzali frekvenční spektrum některého šumu, například růžového, a "převodli" jej na viditelné světlo, mělo by růžovou barvu. Výjimkou je hnědý šum, což bude vysvětleno v kapitole 2. Jde o to, že daný šum nemá na všech frekvencích stejnou energii. To, na kterých frekvencích má nejvíce energie, určuje jeho barvu ve viditelné oblasti elektromagnetického záření. Lze tak spatřit jistou analogii mezi **barvami šumů** a optickým hranolem, jímž prochází bílé světlo, které se láme a rozkládá na jednotlivé vlnové délky, čímž vytváří duhový efekt. Barvy jsou seřazeny od nejnižší frekvence (červené světlo) po nejvyšší (fialové světlo), jak je znázorněno na obr. 4 [9][10][11].



Obr. 4: Rozklad bílého světla optickým hranolem [zdroj: http://polar-peza.euweb.cz/zpusoby_polarizace.html].

Velmi podobně jako je v optice hranolem rozkládáno právě bílé světlo, se i v odvětví elektroakustiky bílý šum považuje za referenční. U všech zbývajících šumů se totiž strmost průběhu výkonové spektrální hustoty odvíjí právě od bílého šumu. Tak, jako se dá transformovat bílé světlo na barevné pomocí barevného sklíčka, lze i bílý šum snadno změnit na barevný použitím vhodného filtru, který by zvýrazňoval určité frekvence. Výsledný signál (šum) bude mít sice stále náhodný průběh, ale bude o něco předvídatelnější než původní bílý šum právě proto, že bude dopředu známo, které frekvence se zvýrazní [9][10].

Podle některých zahraničních pramenů jako je již zmiňovaný web Rane corporation [9], nebo serverů Media College [12] či Wired.co.uk [13] existují tyto šumy:

- bílý,
- růžový,

- modrý,
- černý,
- hnědý (červený),
- šedý,
- fialový,
- oranžový,
- zelený.

Každý z nich má svou reprezentaci jak ve formě zvukové stopy, tak i ve formě obrazové. Všem zmíněným šumům bude věnována zvláštní pozornost v rámci následující kapitoly.

2 BARVY ŠUMU

V této kapitole budu podrobněji specifikovat jednotlivé šумы podle barev tak, jak jsem je uvedl v kapitole 1.4.1. Všechny důležité termíny týkající se signálů a šumu jsem již objasnil v předchozí kapitole. Pro jednoznačnost následujících podkapitol je důležité ještě vysvětlit výraz **oktáva a decibel**, který bude hojně užíván. V hudbě se oktávou rozumí osm tónů v řadě za sebou. V elektroakustice tento termín představuje kmitočtové pásmo, jehož nejvyšší frekvence je dvojnásobkem té nejnižší [14]. Například oktáva je frekvence od 20 Hz do 40 Hz stejně jako 40-80 Hz

$$\frac{f_2}{f_1} = 2. \quad (2.1)$$

2.1 Bílý šum

Bílý šum je nejběžnější, nejznámější a nejjednodušší ze všech druhů šumů. Je považován za základní, referenční, odvíjí se od něj všechny ostatní šумы. Tak, jako bílé světlo je složeno ze všech frekvencí (barev), tak i bílý šum je složen ze všech frekvencí (zvukových). Technicky vzato by šum mohl být frekvenčně neomezený, šířka pásma by tím pádem byla nekonečná. Ale jelikož v této práci budu šum zkoumat pouze z hlediska zvukového, dostačuje brát v úvahu pouze slyšitelnou část kmitočtů šumu.

Mohu tedy říci, že je to náhodný signál obsahující stejné množství energie v každém frekvenčním pásmu, pokud budou všechna pásma uváděna v Hz a budou stejně velká. Například může mít jedno pásmo šířku 20 Hz, a tudíž bude v pásmu 200 – 220 Hz stejné množství energie jako v pásmu 600 – 620 Hz. K dosažení konstantního průběhu závislosti energie na kmitočtu (což je jinými slovy průběh výkonové spektrální hustoty šumu) během měření by tedy bylo nutné použít filtr s pevnou šířkou pásma (například zmiňovaných 20 Hz).

Typicky se pro měření používají filtry s proměnnou šířkou pásma, například 1/3 oktávy, což se rovná šířce pásma 23 %. To znamená, že pro každý kmitočet se mění měřená šířka pásma na 23% z daného kmitočtu. Opět příklad: Bude-li kmitočet 1000 Hz, měřicí pásmo bude mít šířku 230 Hz. Pokud by byl 2000 Hz, změnila by se šířka pásma na 460 Hz. Potom by už výkonová spektrální hustota šumu rostla se strmostí 3 dB na oktávu. Toto je přesně důvod, proč nevnímáme bílý šum stejně intenzivně na všech frekvencích, ale připadá lidem na vyšších frekvencích hlasitější. Lidské ucho totiž slyší dá se říci logaritmicky [9][12].

Autokorelační funkci bílého šumu $e(t)$ s nulovou střední hodnotou a se spojitým časem bude možné spočítat podle vzorce [5]:

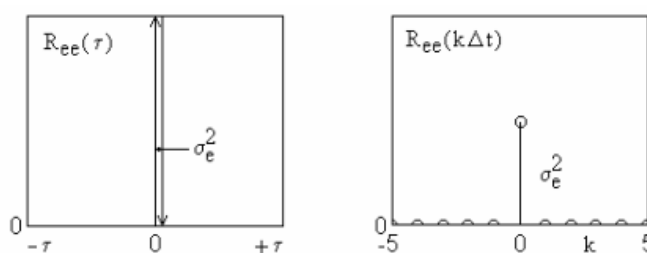
$$R_{ee}(\tau) = E\{e(t) e(t + \tau)\} = \sigma^2 \delta(\tau), \quad (2.2)$$

kde symbolem σ^2 je značen rozptyl bílého šumu a $\delta(\tau)$ je Diracova funkce. Z toho

vyplývá, že autokorelační funkce je Diracova funkce o ploše σ_e^2 . Po aplikaci Fourierovy transformace k výpočtu výkonové spektrální hustoty vychází následující vzorec [5]:

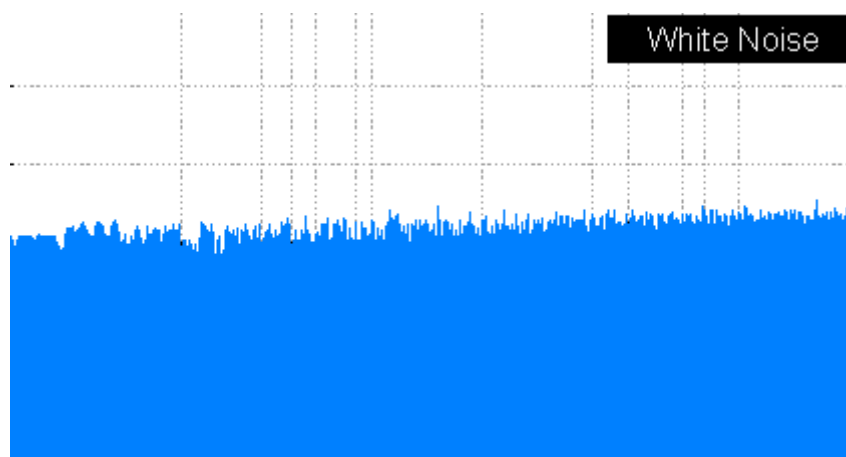
$$S_{ee}(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} \sigma_e^2 \delta(\tau) \exp(-j\omega\tau) d\tau = \sigma_e^2 \exp(-0) = \sigma_e^2. \quad (2.3)$$

Vyplývá z něj, že výkonová spektrální hustota bude skutečně konstantní. Šumové signály, které budu uvažovat v této práci, by teoreticky měly být výhradně se spojitým časem, měly by tedy mít nekonečné frekvenční spektrum, což by znamenalo nekonečný výkon bílého šumu. Ve skutečnosti ale čas bude vždy diskrétní a proto i spektrum bude omezené [15], jak ukazuje obr. 5.



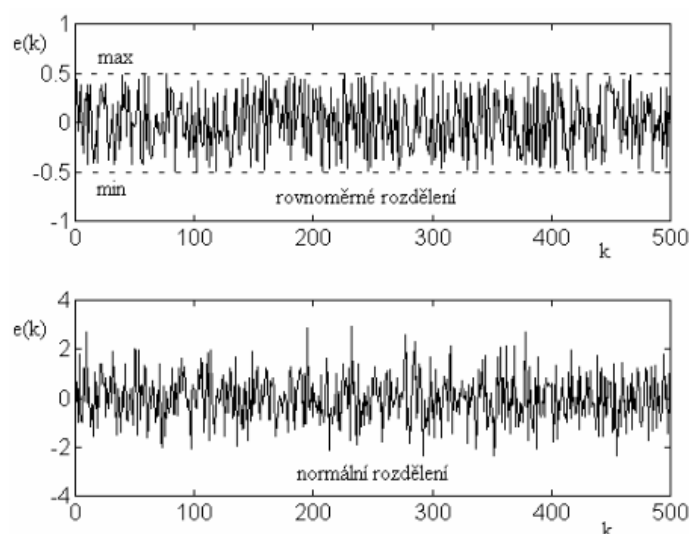
Obr. 5: Autokorelační funkce bílého šumu – spojitý a diskrétní proces [15].

K tomu, aby byl signál označen za bílý šum, však stačí, aby měl spektrum na určitém frekvenčním rozsahu konstantní [5][6]. Na obr. 6 je naznačeno právě spektrum bílého šumu.



Obr. 6: Spektrum bílého šumu [zdroj: <http://www.thespiritresearchsociety.com>].

Bílý šum ale může mít i své „podtypy“ podle toho, jaké rozdělení pravděpodobnosti bude mít. To však nemá vliv na jeho definici, kterou jsem doteď uvedl. Pokud by bylo jeho rozdělení normální, potom se mu říká bílý gaussovský šum. Na obr. 7 je srovnání dvou průběhů, během kterých bylo realizováno 500 vzorků bílého šumu s rovnoměrným a normální rozdělením pravděpodobnosti. Je vidět, že každý graf má jiné měřítko. Bílý gaussovský šum se pohybuje mezi -3 a +3 s pravděpodobností 97,3%. Na průběhu náhodného šumu se obvykle podepisuje množství dílčích vlivů a proto pro jeho jednotlivé náhodné veličiny je nepřírozenější normální rozdělení pravděpodobnosti [15].

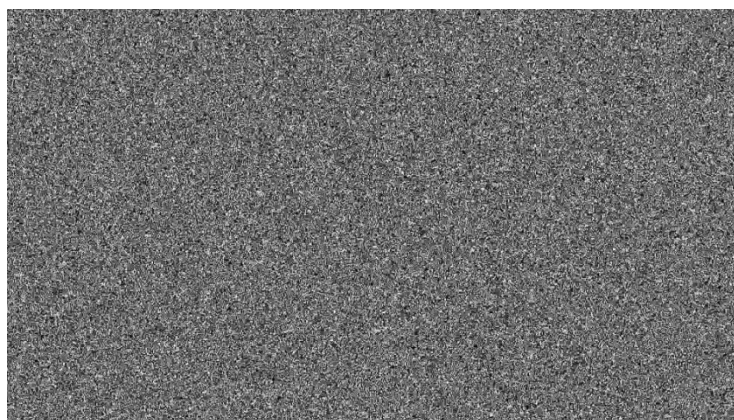


Obr. 7: Průběh bílého šumu s rovnoměrným a normálním rozdělením [15].

Lze se setkat s názorem, že bílý šum uklidňuje a uspává, a proto je možné na internetu nalézt videa s bílým šumem (třeba desetihodinové smyčky) nebo je také nabízen na CD – zvuky moře, vítr, apod. Ovšem tyto přírodní zvuky nejsou bílým šumem v pravém slova smyslu, jelikož bílý šum se v přírodě běžně nevyskytuje. Zmíněné zvuky jsou blízké spíše růžovému šumu. Čistě bílý šum naopak podle profesora počítačových věd A. B. Downeyho [11] není příliš uklidňující.

Nespornou výhodou však bílý šum poskytuje v maskovací schopnosti okolních zvuků, ať jsou to hovory mezi lidmi či ruch dopravy na ulici. Lidský mozek je totiž schopen vyčlenit jednoduché frekvence, ale pokud slyší příliš mnoho frekvencí najednou, stávají se pro něj rušivým elementem. Proto některé firmy pouští svým zaměstnancům bílý nebo růžový šum, aby se lépe soustředili na práci, jelikož nebudou okolní zvuky vnímat tak výrazně [10][12]. Někteří nekonvenční psychologové či psychiatři jej pouští i svým pacientům [16].

Co se týče zvuku bílého šumu, zní, jako syčení nebo jako nenaladěné FM rádio [11]. Jak by vypadal v obrazové formě, ukazuje obr. 8.



Obr. 8: Bílý šum v obrazové formě [zdroj: youtube.com].

V audio testování se používá bílý šum, aby se zjistilo, zda mikrofon reaguje na každou frekvenci v rámci dané šířky pásma. Jelikož bílý šum dokáže přehrát všechna kmitočtová pásma se stejnou amplitudou, tak ukáže, jak se mikrofon chová v jednotlivých frekvencích pro danou šířku pásma.

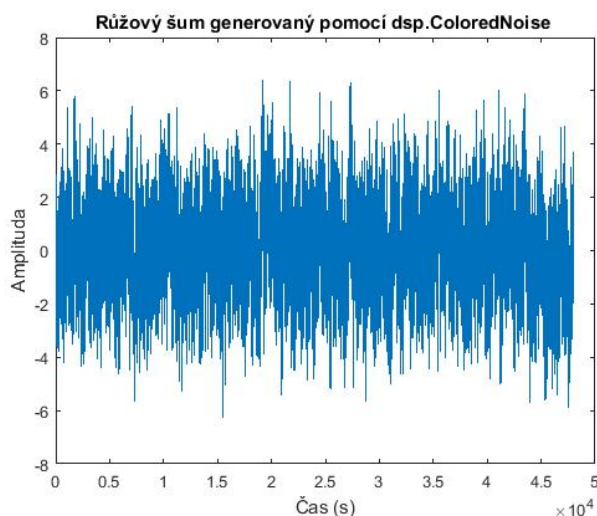
Bílý šum se používá u některých sirén pohotovostních vozidel, protože má schopnost proniknout ostatními zvuky prostředí a nezpůsobuje ozvěnu, což umožní snazší určení směru, odkud přichází.

Nakonec zbývá otázka, k čemu je vlastně bílý šum dobrý? Kromě zmíněné maskovací schopnosti je pomocí něj možné modelovat náhodné chyby, či jej lze využít při popisu přenosových vlastností lineárních dynamických systémů. Používán je také v elektronické hudbě, buď přímo coby zvukový efekt, nebo jako základ pro syntetické zvuky a syntézu řeči. Pro zajímavost - například na zvuku bicích nástrojů má velký podíl složka bílého šumu [5][12].

2.2 Růžový šum

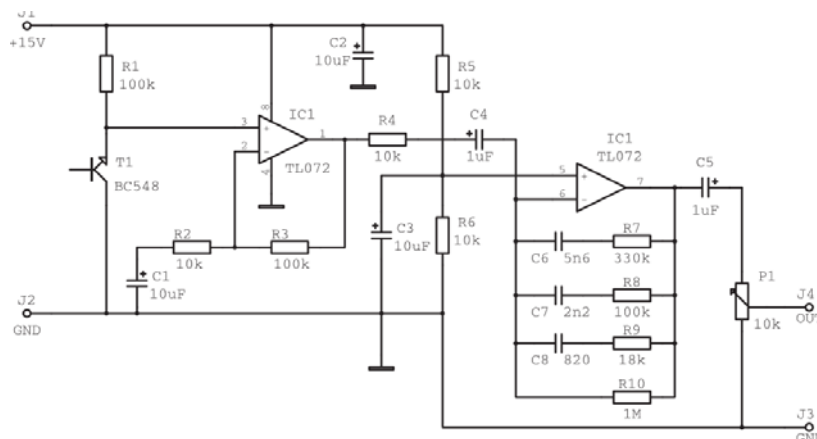
Růžový šum si je s bílým hodně podobný. Představuje přechod mezi bílým a červeným šumem. V mnoha především zahraničních zdrojích je označován také jako " $1/f$ " šum či kmitající šum. Znamená to, že spektrum signálu je úměrné převrácené hodnotě frekvence ($1/f$). Růžový šum stejně jako bílý obsahuje všechny pro lidské ucho slyšitelné frekvence, tedy od 20 do 20 000 Hz. Signál tím pádem považujeme za širokopásmový [5][14].

Zásadní rozdíl však přichází ve spektrální výkonové hustotě jednotlivých šumů. Výkon růžového šumu klesá o 3 dB na oktávu. Znamená to, že růžový šum je na nižších frekvencích hlasitější než na frekvencích vyšších. Nicméně většina lidí tyto rozdíly v růžovém šumu nedokáže vnímat. Je to způsobeno tím, že energie šumu je stejná v pásmech, která jsou stejně široká v logaritmickém měřítku. Jinými slovy i přesto, že výkon šumu s rostoucí frekvencí klesá, růžový šum dosahuje stejného výkonu na jednu oktávu díky tomu, že šířka po sobě jdoucích oktáv se zvyšuje [11][14].



Obr. 9: Růžový šum generovaný pomocí knihoven matlabu.

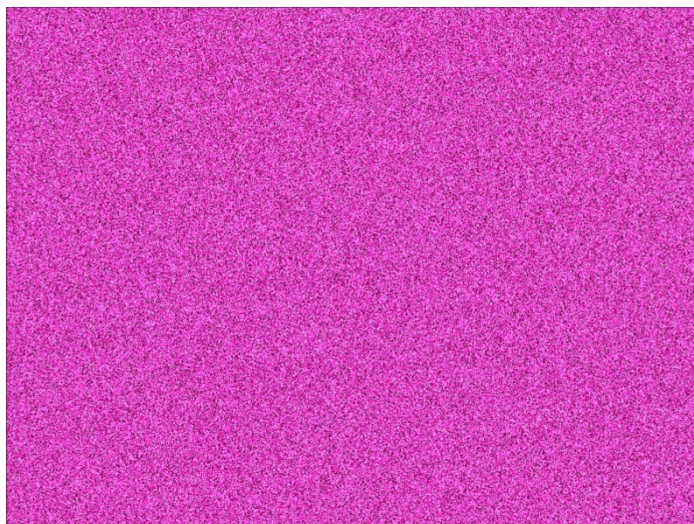
Růžový šum lze „vyrobit“ z bílého celkem snadno. V podstatě stačí zvýraznit nízké frekvence a „ořezat“ vyšší. Technicky by se to dalo realizovat generátorem bílého šumu a filtrem se strmostí 3dB na oktávu. Příklad takového zapojení je na obr. 10. Kdyby byl tento postup aplikován na oblast viditelného elektromagnetického záření, výsledkem by bylo narůžovělé světlo. Avšak podobně jako u bílého šumu by i u růžového byl jeho výkon nekonečný a proto úplně stejně dostačuje, když je šum růžový v určitém rozmezí kmitočtů.



Obr. 10: Schéma zapojení generátoru růžového šumu [17].

Využití růžového šumu je vcelku obdobné jako u bílého. Jednak má stejnou maskovací schopnost, takže opět může být využit k odfiltrování okolních zvuků, a jednak je to nejčastěji využívaný druh šumu v audio technice. Pro testování, zda různé audio systémy (zesilovače, korekční předzesilovače či reproduktorové systémy) reagují na všech využitelných frekvencích (například v posluchárnách), je totiž mnohem vhodnější než bílý šum, který by díky svým vlastnostem mohl zničit výškový reproduktor.

Růžový šum zní jako zasyčení smíchané s rachotem, jde připodobnit i k šumu uvnitř letadla nebo k televizi, která není naladěná právě na žádný program. Jeho obrazový signál by mohl vypadat například jako na obr. 11. Přirozeně se vyskytuje v mnoha systémech, ať už v biologii (srdeční rytmus), v dopravě (silniční provoz), v astronomii, elektronice a dalších. Existuje řada aplikací, pomocí kterých si lze růžový šum pustit na počítači (třeba k práci) [10][14][17].

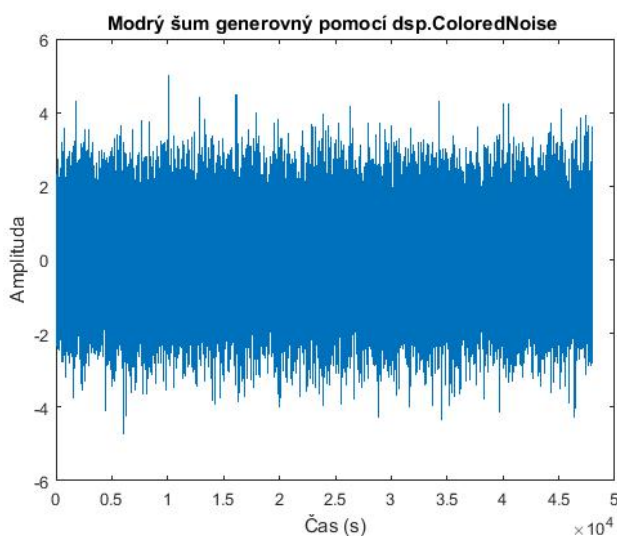


Obr. 11: Obrazová podoba růžového šumu [zdroj: youtube.com].

Na koncertech hudebních skupin se musí natočit reproduktory tak, aby byla dokonalá frekvenční charakteristika na všech pozicích posluchačů (publika). Čili se musí, se speciálním měřicím mikrofonom obcházet celé hlediště a natáčet reproduktory tak dlouho, dokud není celková frekvenční charakteristika uspokojivá.

2.3 Modrý šum

Modrému šumu se říká také azurový. Je velmi podobný růžovému šumu s tím rozdílem, že výkonová spektrální hustota šumu se s rostoucí frekvencí zvyšuje o 3 dB na oktávu. To znamená, že výkon šumu je přímo úměrný frekvenci. Proto může být považován za vysokofrekvenční. A protože na horním konci viditelného elektromagnetického záření se nachází právě modrá barva, jde o modrý šum [10][12][18].



Obr. 12: Modrý šum generovaný pomocí knihoven matlabu.

Díky danému průběhu výkonu zní modrý šum jako pronikavé syčení, ve kterém chybí jakékoliv hlubší tóny (basy), čili jako zvuk není příliš zajímavý. Své uplatnění ale v audio oblasti má. Bývá používán v procesu, kterému se říká *dithering*. Je to forma úpravy zvukové stopy, kdy je do ní záměrně přidán modrý šum. Pokud se totiž původní zvuková stopa, která se má číslicově zpracovávat, příliš nemění, vznikají pak při kvantování chyby. Přidáním šumu se výsledná stopa vyhladí, vyrovná. Sníží se tak slyšitelnost zkreslení [10][18][19].

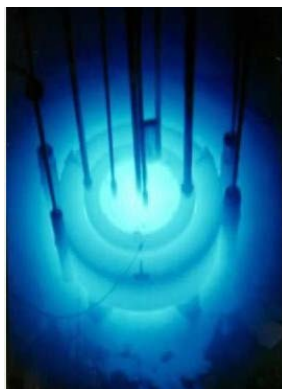
Kromě toho ale modrý šum nalézá uplatnění také v obrazové oblasti, přesněji v počítačové grafice a v počítačovém vidění. V počítačové grafice se modrý šum používá jako označení pro jakýkoliv šum s minimální nízkofrekvenční složkou bez větších kolísání výkonu. Je možné jej popsat i jako izotropní ještě nestrukturované rozložení bodů.

Zmiňovaný dithering lze uplatnit i ve zpracování obrazu. Modrý šum totiž zachycuje intenzitu obrazu prostřednictvím různé hustoty bodů, aniž by zaváděl vlastní strukturu. Proto se rychle stal populární právě v počítačové grafice, kde za prvé jeho izotropní vlastnosti vedou k velmi kvalitnímu vzorkování vícerozměrných signálů a za druhé absence struktury modrého šumu funguje jako prevence vzniku aliasingu. Obr. 13 ukazuje, jaký vliv má zanesení modrého šumu do obrazové informace před samotným zpracováním. Dokonce se uvádí, že jeho vizuální účinnost je přímo spojena s uspořádáním fotoreceptorů modrého šumu na sítnici lidského oka [19][20].



Obr. 13: Vliv modrého šumu v obraze [19].

Přirozeně se téměř dokonalý modrý šum vyskytuje ve formě Čerenkovova záření. Je možné jej vidět v jaderných reaktorech, kde se jako moderátor používá voda. Pokud totiž voda obklopuje určité radioaktivní látky, emituje slabé modré světlo [21]. Jak to v praxi vypadá, ukazuje Obr. 14.



Obr. 14: Čerenkovovo záření [21].

2.4 Černý šum

Pro černý šum neexistuje oficiální definice, objevuje se řada odlišných vysvětlení, proto zde uvedu pouze ty nejčastější [12][13]:

- Ticho, tím pádem nulová spektrální výkonová hustota.
- Šum, který má spektrum $1/(f^\beta)$, přičemž $\beta > 2$.
- Šum s nulovým výkonem na většině frekvencí, ale jsou přípustné občasné náhodné špičky.
- Šum vytvořený aktivními odhlučňovacími systémy pro potlačení existujícího šumu (hluky) – tzv. negativní šum.
- Ultrazvukový bílý šum, tzn. bílý šum mimo rozsah slyšitelných frekvencí. Může mít však vliv na okolní prostředí – např. odháněč škůdců či hmyzu.

2.5 Hnědý šum

Hnědý nebo také červený šum nedostal své jméno kvůli barvě, ačkoliv by převeden na viditelné světlo měl tmavě červenou barvu. Je to kvůli tzv. Brownovu pohybu, při němž je produkován šumový signál podobný hnědému šumu. Brownovu pohybu se říká také „náhodná chůze“ [10][12].

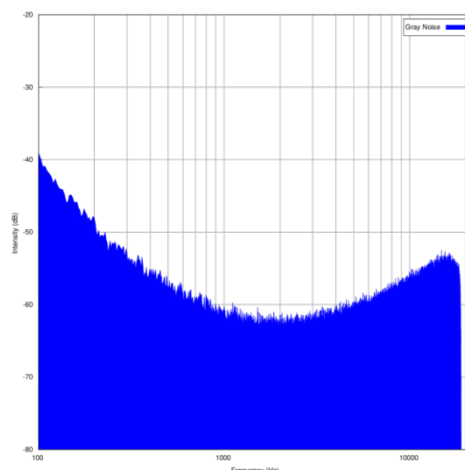
Průběh výkonové spektrální hustoty je podobný jako u růžového šumu, ale s tím rozdílem, že se snižuje o 6 dB na oktávu, což znamená, že je výkon hnědého šumu přímo úměrný $1/f^2$. Díky tomu má větší energii na nízkých frekvencích. Proto zní jako hřmění, vlny či hluk větru [10][12]. Své využití má v oceánografii či klimatologii, kde slouží k popisu klimatických změn.

Hnědý šum se používá ke kontrole subwooferových problémů fáze. Chceme-li správně integrovat subwoofer do vašeho audio systému, subwoofer by měl být ve fázi s ostatními ovladači. To dosáhneme poupravením fáze subwoofer, a to tak, že musí vydávat co nejmenší basy, pak jen otočením jeho polaritu a vše se vyřeší.

Ve zdravotnictví se hnědý šum používá k léčbě přecitlivění, zvýšenou citlivostí na běžné zvuky životního prostředí, nebo maskování hučení v uších, zvonění v uchu vyskytující se bez jakéhokoliv podnětu.

2.6 Šedý šum

Šedý šum je takový, který lidské ucho vnímá na všech frekvencích stejně hlasitě. Podobně to je sice i u růžového šumu, ale šedý šum má jinou spektrální výkonovou hustotu. Dá se říct, že kopíruje psychoakustickou křivku hlasitosti, která kompenzuje právě rozdíly ve vnímání hlasitosti na jednotlivých frekvencích. To znamená, že má větší výkon na spodní a horní hranici slyšitelnosti – viz obr. 15. Využívá se toho například ve studiích, kde jsou zkoumáni sluchově postižení. Vědci jsou díky šedému šumu schopni posoudit, jak se daná osoba liší od průměru [9][12][13].



Obr. 15: Spektrální výkonová hustota šedého šumu [zdroj: en.wikipedia.org].

2.7 Fialový šum

Fialový či také purpurový šum je podobný hnědému, ale jeho výkonová spektrální hustota roste o 6 dB na oktávu, jde tedy o vysokofrekvenční šum. Výkon šumu je tím pádem úměrný f^2 . Může se používat k léčbě tzv. tinnitu, což je v podstatě šelest v uších. Ten má vysokofrekvenční charakter, takže jej fialový šum díky intenzitě na vysokých kmitočtech je schopen maskovat [9][12][13]. Fialový šum může znít podobně jako například zvuk otevřeného vodovodního kohoutku. Podle serveru Techopedia.com může být i fialový šum použit v ditheringu [22].

2.8 Oranžový šum

Ani pro oranžový šum neexistuje oficiální definice. Často se uvádí, že jeho konečné výkonové spektrum obsahuje několik kmitočtových pásem, která jsou zcela potlačena – mají nulový výkon a jsou rozptýlena napříč spojitým spektrem. Souvisí především s hudebními stupnicemi. Tato pásma nulové energie jsou soustředěna přesně na frekvencích, kde se nachází hudební noty. To znamená, že to, co je dokonale naladěno, není slyšet a všechno ostatní („rozladěné noty“) ano, což vytváří značně nelibý hluk. Oranžový šum může být použit pro kontrolu naladění [12][13].

2.9 Zelený šum

Bohužel ani zelený šum nemá svůj exaktní popis. Objevují se dvě možné definice zeleného šumu [12][13]:

- Středová frekvence spektra bílého šumu.
- Všudypřítomný šum na pozadí. Jakýsi novodobý ruch okolního světa, který by byl průměrem z několika různých míst po světě během delšího časového úseku. Zní podobně jako růžový šum, ale má zesílené pásmo kmitočtů okolo 500 Hz.

3 PRAKTICKÁ ČÁST

Úkolem této práce je vytvořit generátor barevných šumů, a to zejména: bílého, růžového, hnědého, modrého a fialového šumu. K vytvoření uvedených šumů použijeme software Matlab a jeho knihovny (Toolbox).

Ke generování šumu jsem zvolil tři metody:

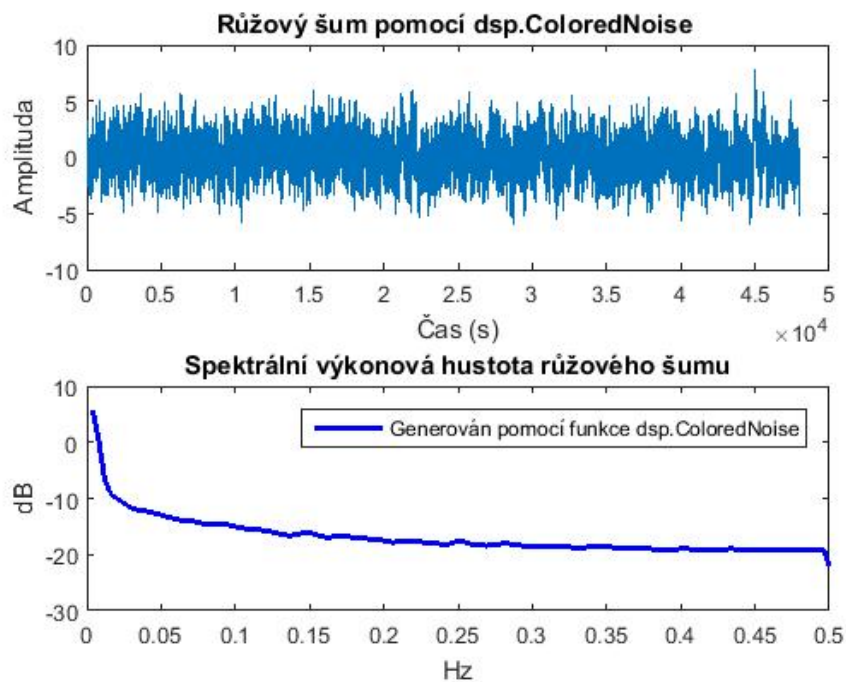
- Pomocí funkce, kterou má v sobě zabudovaný matlab (dps.ColoredNoise).
- Pomocí násobení frekvenční charakteristiky.
- Pomocí filtru FIR.

3.1 Generování pomocí funkce dps.ColoredNoise

Funkce dps.ColoredNoise generuje barevný šum s výkonným spektrem $1/(f)^\alpha$ po celém frekvenčním rozsahu, α inverzní frekvence energie je reálné číslo z intervalu $[-2;2]$. Tato funkce umožňuje parameter nastavitna:

- Pink (default) – Generuje růžový šum, nastaví sílu inverzní frekvence na 1.
- White – Generuje bílý šum, nastaví sílu inverzní frekvence na 0.
- Brown - Generuje hnědý šum, nastaví sílu inverzní frekvence na 2.
- Blue - Generuje modrý šum, nastaví sílu inverzní frekvence na -1.
- Purple - Generuje fialový šum, nastaví sílu inverzní frekvence na -2.

```
%růžový šum (pomocí toolboxu)
Fvz = 48000;
hpink = dsp.ColoredNoise(1,Fvz,1);
pink = step(hpink);
pink = abs((pink)./max(pink));
[PSDPink,F] = pwelch(pink,hamming(128),[],[],1,'psd');
figure
plot(F(2:end),10*log10(PSDPink(2:end)),'r','linewidth',2)
xlabel('Hz'); ylabel('dB');
title('Růžový šum');
```



Obr. 16: Růžový šum vygenerován pomocí funkce dsp.ColoredNoise

3.2 Generování pomocí násobení frekvenční charakteristiky

Nejdříve si vygenerujeme bílý šum, jeho frekvenční charakteristiku poté vynásobíme charakteristikou šumu, který chceme dostat. Zde budu demonstrovat ukázkou pro růžový šum, generování ostatních výše uvedených šumů je podobné jako růžového šumu, liší se jen v pár funkcích, které zde budou uvedeny.

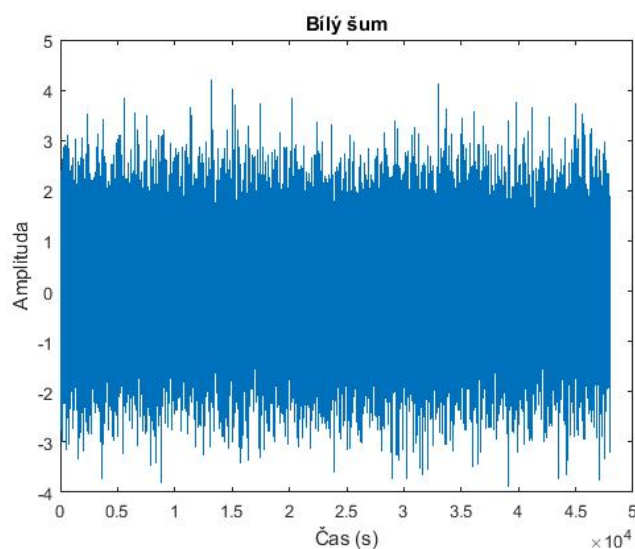
Bílý šum vygenerujeme pomocí funkce randn (generátor pseudonáhodných čísel s normálním rozložením). Na začátku si definujeme vstupní parametry pro růžový šum, $L = 48\,000$ – délka vzorkovací frekvence, $\mu = 0$ – střední hodnota, $\sigma = 1$ – standardní odchylka. Poté si generujeme bílý šum, pomocí funkce randn určíme vícerozměrné pole pseudonáhodných hodnot (u nás je to konkrétně stejnorozměrné pole 48 000 o 1 hodnotě), které vynásobíme standardní odchylkou a přičteme střední hodnotu. Z této funkce dostaneme bílý šum – viz obr. 17.

```

% bílý šum
clear all;
close all;
clc;

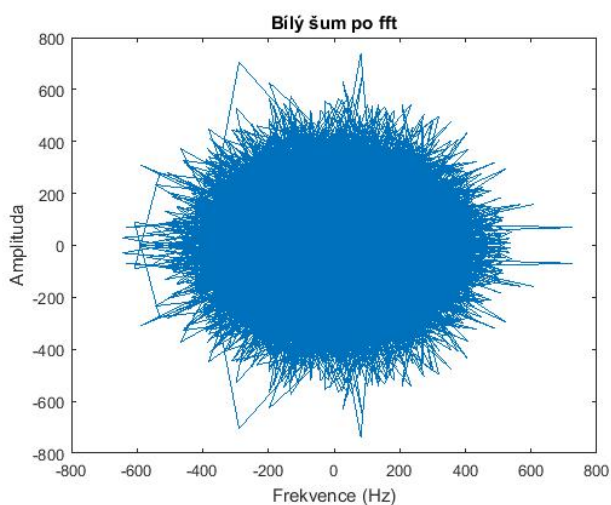
L = 48000;
mu = 0;
sigma = 1;
x = sigma * randn ( L , 1 ) + mu ;
%-----
plot(abs(x));
title ('Bílý šum');
xlabel ('Čas (s)');
ylabel ('Amplituda')

```



Obr. 17: Bílý šum vygenerován pomocí $x = \text{sigma} * \text{randn} (L , 1) + \text{mu}$

Rychlou Fourierovou transformací se signál x transformuje z časové oblasti, do oblasti frekvenční, bílý šum po FFT na obr.



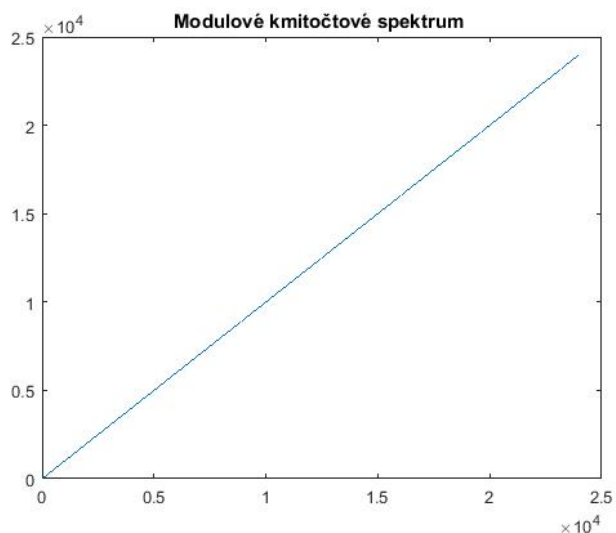
Obr. 18: Bílý šum po FFT

Následující tři řádky upraví spektrum růžového šumu. Růžový šum se snižuje rychlostí -3 dB/oktávu, filtry mají frekvenční charakteristiku ± 6 dB/oktávu, toto vyřeší použití odmocniny. Obr. 19 nám demonstruje modulové kmitočtové spektrum ještě před odmocněním, a obr. 20 už po odmocnění – tímto modulovým kmitočtovým spektremse bude dělit bílý šum po fft.

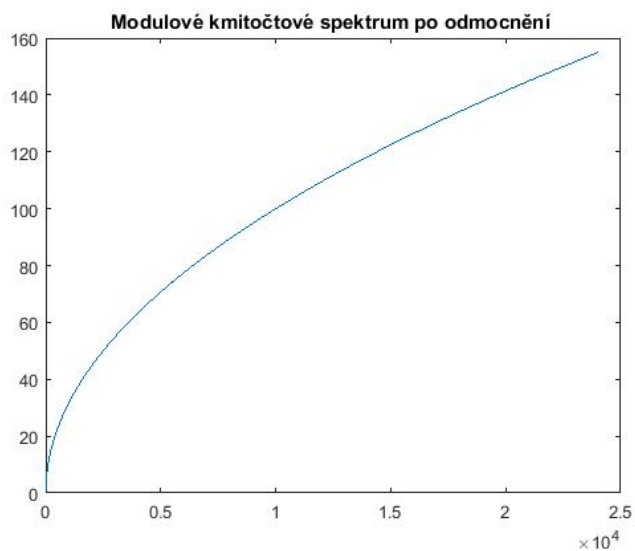
```
NumUniquePts = M/2 + 1;
```

```
n = 1:NumUniquePts;
```

```
n = sqrt(n);
```



Obr. 19: Modulové kmitočtové spektrum



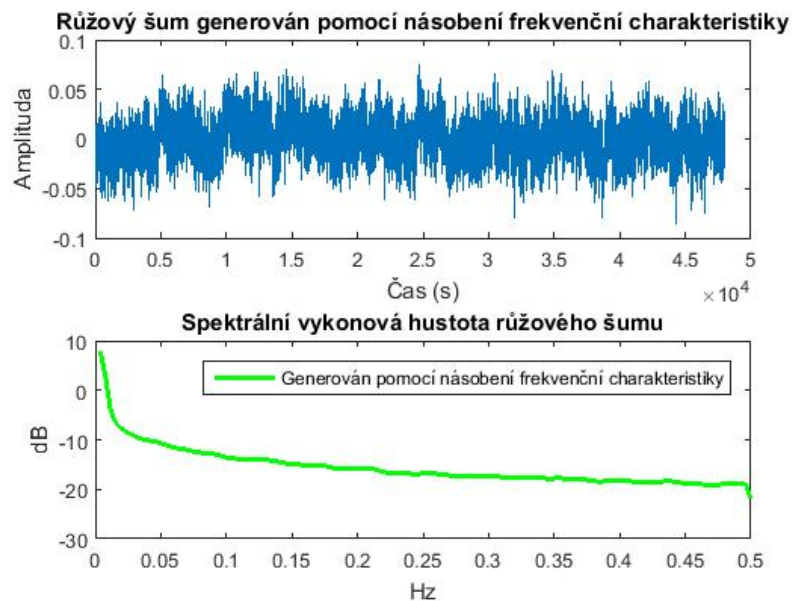
Obr. 20: Modulové kmitočtové spektrum po odmocnění

Zde dělím bílý šum modulovým kmitočtovým spektrem růžového šumu. Dále si připravíme pravou polovinu spektra, kopíruje levou s výjimkou stejnosměrné složky Nyquist frekvence - ty jsou jedinečné.

```
X = fft(x,M);
Z=zeros(M,1);
Z(1:M/2+1) = X(1:M/2+1)./n(:);
Z(NumUniquePts+1:M) = real(Z(M/2:-1:2)) -1i*imag(Z(M/2:-1:2));

y=ifft (Z,M);
subplot (2,1,1)
plot(y),title ('Růžový šum');
xlabel ('Čas (s)');
ylabel ('Amplituda')

y = abs((y)./max((y)));
[Pxx1,F1] = pwelch(y,hamming(128),[],[],1,'psd');
subplot (2,1,2)
plot(F1(2:end),10*log10(Pxx1(2:end)),'r','linewidth',2);
xlabel('Hz'); ylabel('dB');
title('Spektrální výkonová hustota růžového šumu');
```



Obr. 21: Růžový šum generován násobením frekvenční charakteristiky

3.3 Filtrace bílého šumu pomocí filtru FIR

U této metody je nejdůležitější příkaz `firpm`, který optimalizuje FIR filtr s využitím algoritmu Parks-McClellan. Algoritmus Parks-McClellan se používá k navrhnutí a implementaci efektivních a optimálních FIR filtrů. Algoritmus používá Remez výměnný algoritmus a Chebyshev teorii aproximací navrhnutí filtrů s optimálním přizpůsobením mezi požadovanou a skutečnou frekvenční odezvou. Filtry jsou optimální v tom smyslu, že maximální chyba mezi požadovanou frekvenční charakteristikou a skutečnou frekvenční odezvou je minimální [23].

Pro generátor to znamená navrhnutí FIR filtru, přes který přefiltruji bílý šum, a tím z něj dostanu požadovaný šum. Nejtěžší je tedy navrhnout a optimalizovat FIR filtr.

```
%-----bílý šum
clear all;
close all;
clc;
L = 48000;
mu = 0;
sigma = 1;
x = sigma * randn ( L , 1 ) + mu ;
```

V prvním úseku jsem si vytvořil bílý šum, který budu později filtrovat.

```
e=[50];
j=0.02:0.02:1;
for f = 1:1:50
    d=f/50;
    a=1/sqrt(d);
    e(f)=a;
end
```

Pomocí for cyklu si f rozdělím na 50 dílků, a každý dílek vynásobím frekvenční charakteristikou příslušnou pro danou část. J jsem si připravil pro funkci `firpm`, rozdělením od 0 do 1 po 0,02 – padesát dílků.

```
n=180;
b = firpm(n, j, e);
```

$b = \text{firpm}(n, j, e)$ vrací řádkový vektor b , který obsahuje $n+1$ koeficientů řádů n FIR filtru, jehož frekvenční amplitudová charakteristika odpovídá vektorům j a e .

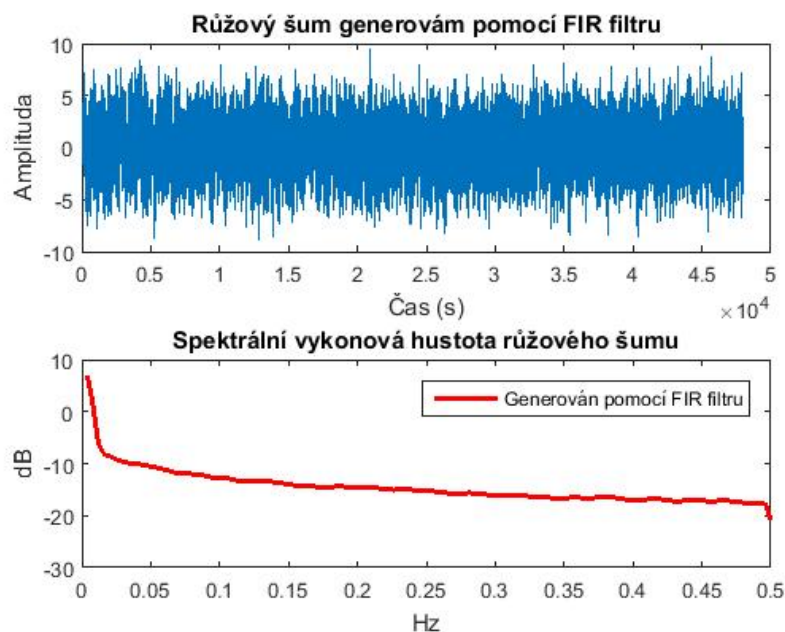
- n – řád filtru (později budeme řád měnit, abychom našli optimální)
- j – vektor normalizované frekvence hran pásů, který se objeví monotónně mezi 0 a 1, kde 1 je frekvence Nyquistova,
- e , e a j musí mít stejnou délku, délka musí být sudé číslo.

```
a1=1;
y = filter(b,a1,x);
y = ((y)./max(abs(y)));
```

Zde filtrujeme bílý šum (x), pomocí vytvořeného FIR filtru b , $a1$ jsme si definovali jmenovatele koeficienty racionální přenosové funkce. Další řádek nám provede normalizaci, kde se každý prvek vydělí maximálním prvkem v absolutní hodnotě.

```
subplot (2,1,1)
plot(y),title ('Růžový šum');
xlabel ('Čas (s)');
ylabel ('Amplituda')
y = abs((y)./max((y)));
[Pxx2,F2] = pwelch(y,hamming(128),[],[],1,'psd');
subplot (2,1,2)
plot(F2(2:end),10*log10(Pxx2(2:end)),'r','linewidth',2);
xlabel('Hz'); ylabel('dB');
title('Spektrální výkonová hustota růžového šumu');
```

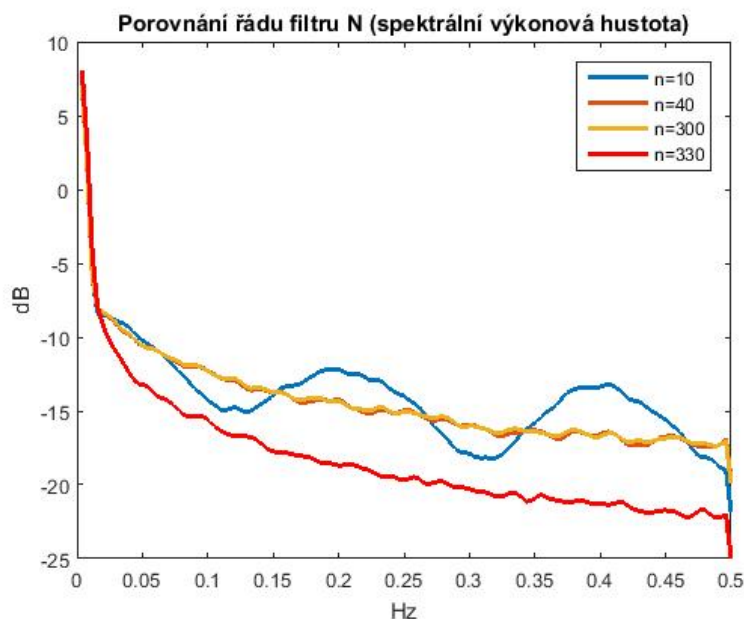
V následujícím kroku jsme provedli optimalizaci a odhad spektrální výkonové hustoty – *pwelch*. Dále jsme si vykreslily vytvořený růžový šum a jeho spektrální výkonovou hustotu.



Obr. 22: Růžový šum generován pomocí FIR filtru

Pro ostatní šумы je generace obdobná, liší se jenom násobením či dělením, zda stoupá spektrální výkonová hustota, nebo naopak klesá. Pro modrý a růžový šum musíme navíc modulovou frekvenční charakteristiku odmocnit.

Optimální řád n FIR filtru jsem určil na $n=170$, řád n od 40 do 300 vychází dle grafického zobrazení stejně. Změna n řádů pod 40 a nad 300 učiní viditelné změny v grafu.

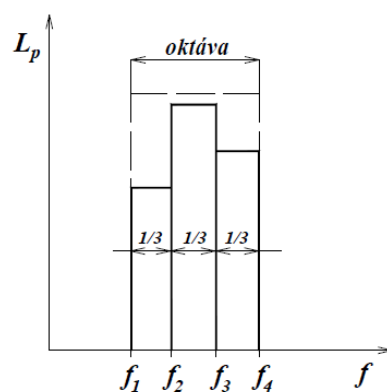


Obr. 23: Závislost výkonové spektrální hustoty růžového šumu na délce FIR filtru.

3.4 Porovnání výsledků

Každý šum dal výsledek o délce pole 1 x 128, ten jsem rozdělil na pole 10 sloupců a 12 řádků, zbylých 8 hodnot jsem vypustil z důvodu pádu na konci grafu. Každý sloupec, o hodnotě 12 řádků jsem vyprůměroval, tudíž jsem dostal 10 hodnot, ve kterých budu porovnávat třetinooktávové pásma.

Třetinooktávové pásmo vznikne rozdělením oktavového pásma na třetiny (v logaritmických souřadnicích). Proto je celkem $n = 30$ třetinooktávových pásem. Frekvence $f1$ až $f4$ přitom ohraničují pásmo jedné oktávy, frekvence $f2$ a $f3$ jsou krajními frekvencemi vnitřní třetiny oktávy. Viz obr. 24 [24].

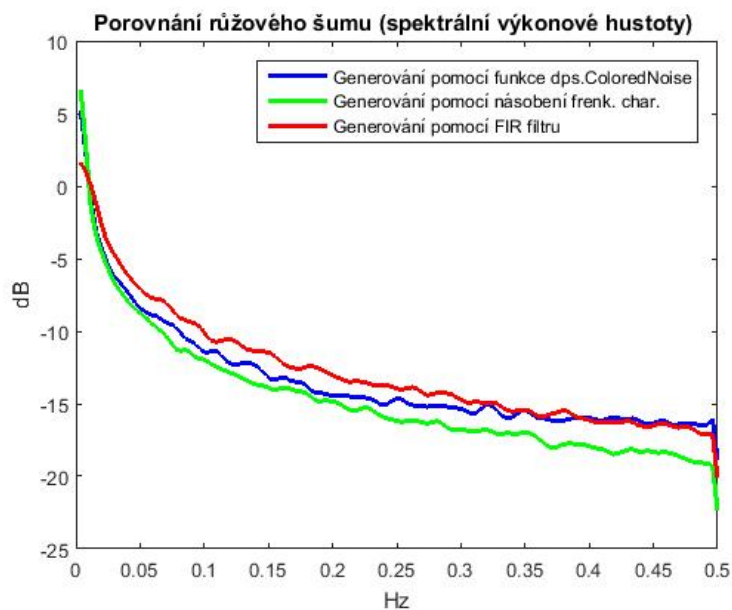


Obr. 24: Příklad třetinooktávového pásma

My si označíme třetinu f_1 - f_2 jako spodní kmitočty třetinooktávových pasem fl , třetinu f_2 - f_3 jako střední kmitočty třetinooktávových pasem ff a třetinu f_3 - f_4 jako horní kmitočty třetinooktávových pasem fu . Tyto třetinooktávové pásma budeme porovnávat z jednotlivých generátorů šumu.

Tab. 1: Srovnání metod generování růžového šumu.

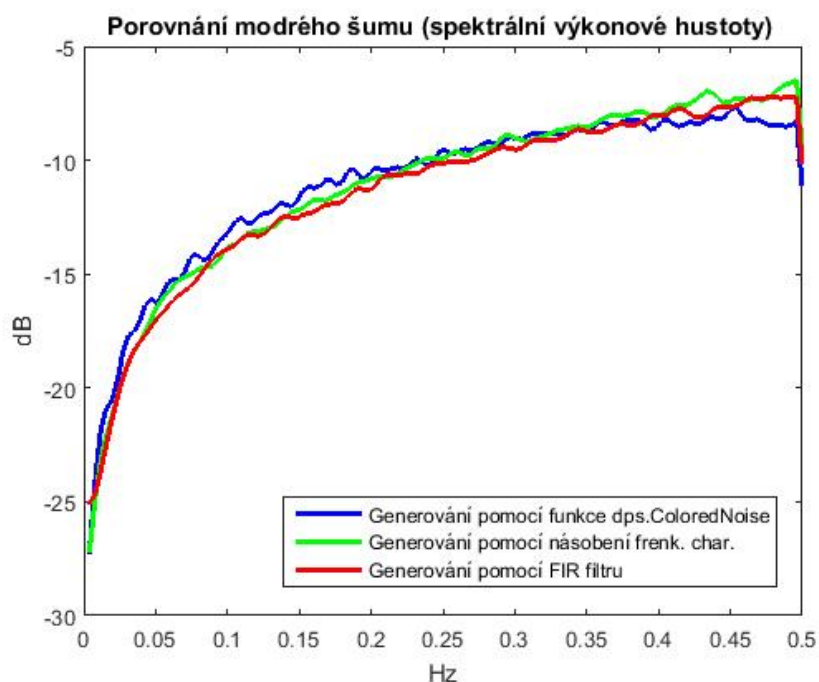
ff střední kmitočty třetinooktávových pasem										
Pomocí dps.ColoredNoise [dB/log2(Hz)]	1243,58	1024,71	1014,49	1010,59	1008,22	1007,17	1006,40	1005,65	1005,42	1005,08
Pomocí nás. frek. char. [dB/log2(Hz)]	1303,47	1020,86	1012,08	1008,53	1006,81	1005,25	1004,38	1003,87	1003,41	1003,09
Pomocí FIR filtru [dB/log2(Hz)]	1159,17	1037,91	1020,96	1014,84	1011,24	1009,17	1007,87	1006,61	1005,98	1005,48
Rozdíl [%]	4,82	0,38	0,24	0,20	0,14	0,19	0,20	0,18	0,20	0,20
Rozdíl [%]	6,79	1,29	0,64	0,42	0,30	0,20	0,15	0,10	0,06	0,04
fl spodní kmitočty třetinooktávových pasem										
Pomocí dps.ColoredNoise [dB/log2(Hz)]	1107,91	912,91	903,81	900,33	898,22	897,28	896,60	895,93	895,73	895,42
Pomocí nás. frek. char. [dB/log2(Hz)]	1161,26	909,48	901,66	898,50	896,96	895,57	894,80	894,35	893,94	893,65
Pomocí FIR filtru [dB/log2(Hz)]	1032,70	924,68	909,58	904,12	900,91	899,07	897,91	896,79	896,23	895,78
Rozdíl [%]	4,82	0,38	0,24	0,20	0,14	0,19	0,20	0,18	0,20	0,20
Rozdíl [%]	6,79	1,29	0,64	0,42	0,30	0,20	0,15	0,10	0,06	0,04
fu horní kmitočty třetinooktávových pasem										
Pomocí dps.ColoredNoise [dB/log2(Hz)]	1395,87	1150,20	1138,73	1134,35	1131,69	1130,51	1129,65	1128,80	1128,54	1128,16
Pomocí nás. frek. char. [dB/log2(Hz)]	1463,10	1145,88	1136,02	1132,04	1130,10	1128,35	1127,38	1126,81	1126,29	1125,93
Pomocí FIR filtru [dB/log2(Hz)]	1301,13	1165,02	1145,99	1139,12	1135,08	1132,75	1131,29	1129,88	1129,18	1128,62
Rozdíl [%]	4,82	0,38	0,24	0,20	0,14	0,19	0,20	0,18	0,20	0,20
Rozdíl [%]	6,79	1,29	0,64	0,42	0,30	0,20	0,15	0,10	0,06	0,04



Obr. 25: Srovnání výkonových spektrálních hustot růžového šumu generované příslušnými metodami (řád FIR filtru 170).

Tab. 2: Srovnání metod generování modrého šumu.

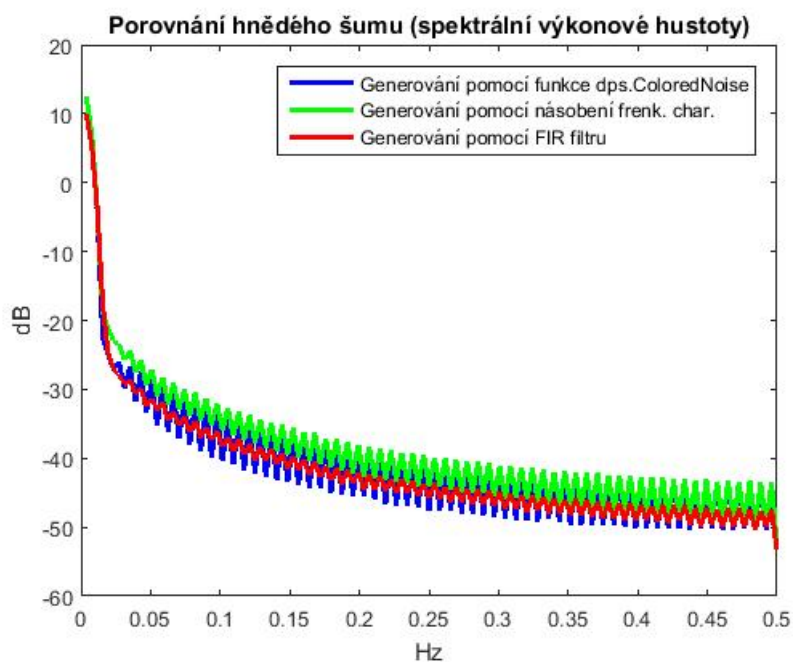
ff střední kmitočty třetinooktávových pasem										
Pomocí dps.ColoredNoise [dB/log2(Hz)]	1002,70	1008,37	1013,89	1019,40	1024,00	1028,28	1032,20	1035,92	1037,99	1039,74
Pomocí nás. frek. char. [dB/log2(Hz)]	1002,50	1008,09	1013,47	1019,06	1024,23	1030,95	1036,42	1041,41	1047,99	1054,72
Pomocí FIR filtru[dB/log2(Hz)]	1002,47	1007,66	1012,48	1018,38	1024,28	1028,65	1033,23	1038,70	1044,78	1049,01
Rozdíl [%]	0,02	0,03	0,04	0,03	0,02	0,26	0,41	0,53	0,96	1,44
Rozdíl [%]	0,02	0,07	0,14	0,10	0,03	0,04	0,10	0,27	0,65	0,89
fl spodní kmitočty třetinooktávových pasem										
Pomocí dps.ColoredNoise [dB/log2(Hz)]	893,31	898,36	903,27	908,19	912,28	916,09	919,58	922,90	924,74	926,30
Pomocí nás. frek. char. [dB/log2(Hz)]	893,13	898,11	902,90	907,88	912,48	918,47	923,35	927,79	933,65	939,65
Pomocí FIR filtru[dB/log2(Hz)]	893,10	897,72	902,01	907,27	912,53	916,42	920,50	925,38	930,80	934,56
Rozdíl [%]	0,02	0,03	0,04	0,03	0,02	0,26	0,41	0,53	0,96	1,44
Rozdíl [%]	0,02	0,07	0,14	0,10	0,03	0,04	0,10	0,27	0,65	0,89
fu horní kmitočty třetinooktávových pasem										
Pomocí dps.ColoredNoise [dB/log2(Hz)]	1125,50	1131,86	1138,05	1144,24	1149,41	1154,20	1158,60	1162,78	1165,11	1167,07
Pomocí nás. frek. char. [dB/log2(Hz)]	1125,27	1131,54	1137,58	1143,86	1149,65	1157,20	1163,35	1168,94	1176,33	1183,88
Pomocí FIR filtru[dB/log2(Hz)]	1125,24	1131,06	1136,47	1143,09	1149,71	1154,62	1159,76	1165,90	1172,73	1177,48
Rozdíl [%]	0,02	0,03	0,04	0,03	0,02	0,26	0,41	0,53	0,96	1,44
Rozdíl [%]	0,02	0,07	0,14	0,10	0,03	0,04	0,10	0,27	0,65	0,89



Obr. 26: Srovnání výkonových spektrálních hustot modrého šumu generované příslušnými metodami (řád FIR filtru 140).

Tab. 3: Srovnání metod generování hnědého šumu.

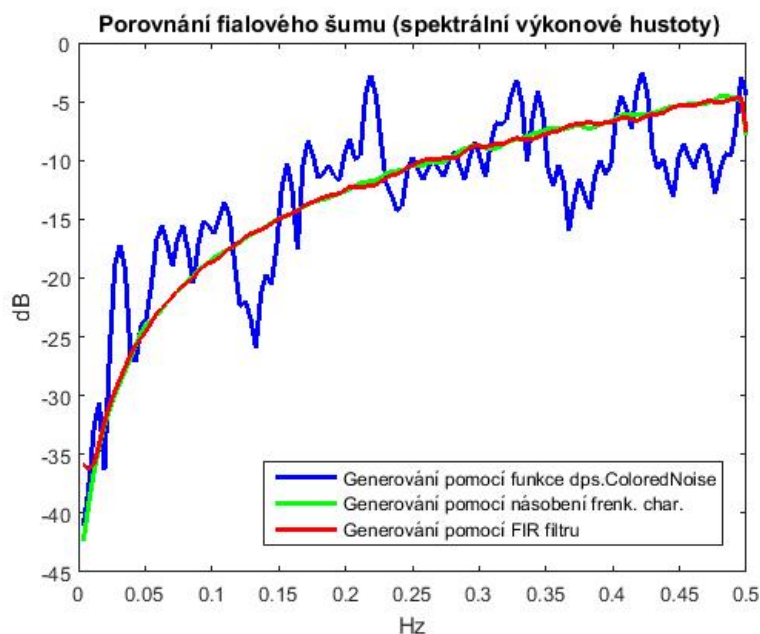
ff střední kmitočty třetinooktávových pasem										
Pomocí dps.ColoredNoise [dB/log2(Hz)]	6984,53	1000,13	1000,05	1000,03	1000,02	1000,01	1000,01	1000,01	1000,01	1000,01
Pomocí nás. frek. char. [dB/log2(Hz)]	7249,31	1000,21	1000,08	1000,04	1000,02	1000,02	1000,01	1000,01	1000,01	1000,01
Pomocí FIR filtru[dB/log2(Hz)]	5145,53	1000,10	1000,04	1000,02	1000,01	1000,01	1000,01	1000,00	1000,00	1000,00
Rozdíl [%]	3,79	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Rozdíl [%]	12,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
fl spodní kmitočty třetinooktávových pasem										
Pomocí dps.ColoredNoise [dB/log2(Hz)]	6222,51	891,01	890,94	890,92	890,91	890,91	890,91	890,91	890,90	890,90
Pomocí nás. frek. char. [dB/log2(Hz)]	6458,40	891,09	890,97	890,93	890,92	890,91	890,91	890,91	890,91	890,90
Pomocí FIR filtru[dB/log2(Hz)]	5282,28	890,99	890,93	890,91	890,91	890,91	890,90	890,90	890,90	890,90
Rozdíl [%]	3,79	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Rozdíl [%]	12,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
fu horní kmitočty třetinooktávových pasem										
Pomocí dps.ColoredNoise [dB/log2(Hz)]	7839,87	1122,61	1122,52	1122,49	1122,48	1122,48	1122,47	1122,47	1122,47	1122,47
Pomocí nás. frek. char. [dB/log2(Hz)]	8137,08	1122,70	1122,55	1122,51	1122,49	1122,48	1122,48	1122,47	1122,47	1122,47
Pomocí FIR filtru[dB/log2(Hz)]	6661,89	1122,57	1122,50	1122,48	1122,47	1122,47	1122,47	1122,47	1122,47	1122,47
Rozdíl [%]	3,79	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Rozdíl [%]	12,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00



Obr. 27: Srovnání výkonových spektrálních hustot hnědého šumu generované příslušnými metodami (řád FIR filtru 500).

Tab. 4: Srovnání metod generování fialového šumu.

ff střední kmitočty třetinooktávových pasem										
Pomocí dps.ColoredNoise [dB/log2(Hz)]	1000,50	1002,28	1009,72	1021,99	1019,44	1072,27	1037,10	1038,71	1105,29	1035,23
Pomocí nás. frek. char. [dB/log2(Hz)]	1000,16	1001,14	1003,13	1006,30	1010,00	1014,96	1021,59	1028,96	1036,87	1047,05
Pomocí FIR filtru[dB/log2(Hz)]	1000,17	1001,16	1003,30	1006,16	1010,55	1016,10	1022,50	1030,44	1037,51	1047,04
Rozdíl [%]	0,03	0,11	0,65	1,54	0,93	5,34	1,50	0,94	6,19	1,14
Rozdíl [%]	0,03	0,11	0,64	1,55	0,87	5,24	1,41	0,80	6,13	1,14
fl spodní kmitočty třetinooktávových pasem										
Pomocí dps.ColoredNoise [dB/log2(Hz)]	891,34	892,93	899,56	910,49	908,21	955,29	923,95	925,39	984,70	922,28
Pomocí nás. frek. char. [dB/log2(Hz)]	891,04	891,92	893,69	896,51	899,81	904,23	910,13	916,70	923,75	932,82
Pomocí FIR filtru[dB/log2(Hz)]	891,05	891,93	893,84	896,39	900,30	905,25	910,95	918,02	924,32	932,81
Rozdíl [%]	0,03	0,11	0,65	1,54	0,93	5,34	1,50	0,94	6,19	1,14
Rozdíl [%]	0,03	0,11	0,64	1,55	0,87	5,24	1,41	0,80	6,13	1,14
fu horní kmitočty třetinooktávových pasem										
Pomocí dps.ColoredNoise [dB/log2(Hz)]	1123,02	1125,02	1133,37	1147,14	1144,28	1203,59	1164,10	1165,92	1240,65	1162,00
Pomocí nás. frek. char. [dB/log2(Hz)]	1122,64	1123,75	1125,97	1129,53	1133,69	1139,26	1146,69	1154,97	1163,85	1175,27
Pomocí FIR filtru[dB/log2(Hz)]	1122,65	1123,76	1126,17	1129,38	1134,30	1140,54	1147,72	1156,63	1164,57	1175,26
Rozdíl [%]	0,03	0,11	0,65	1,54	0,93	5,34	1,50	0,94	6,19	1,14
Rozdíl [%]	0,03	0,11	0,64	1,55	0,87	5,24	1,41	0,80	6,13	1,14



Obr. 28: Srovnání výkonových spektrálních hustot fialového šumu generované příslušnými metodami (řád FIR filtru 100).

U každé metody jsem provedl normalizaci, která vypadala následovně: $y = (y) ./ \max(\text{abs}(y))$ zde se každý prvek vydělil maximálním prvkem v absolutní hodnotě.

Při generování růžového šumu byl nejhorší začátek, kdy při spuštění generování se první úsek lišil od referenční spektrální hustoty o 5 až 7%, další průběh už byl v mezích okolo 0,5%. U generování modrého šumu, metoda pomocí násobení frekvenční charakteristiky, tak i metoda pomocí FIR filtru dosáhla výborných výsledků, v porovnání s metodou, kterou má v sobě zabudovaný matlab (dps.ColoredNoise) se liší o necelé jedno procento. Pro hnědý šum byl problematický zase začátek, kde u metody (násobení frekvenční charakteristiky) byl rozdíl okolo 4% a u metody (FIR filtru) až okolo 12% ale pokračování generování bylo téměř totožné s referenčními hodnotami. U fialového šumu pro změnu byl dobrý začátek generování, ale v průběhu generování byl rozdíl až kolem 5%.

Z tohoto plyne, že se nedá říct, která metoda je lepší pro generování barevných šumů. Obě metody se chovaly dost podobně, je to způsobeno tím, že obě metody v základu vycházejí z násobení modulového kmitočtového spektra.

4 ZÁVĚR

V první kapitole jsem se seznámil s pojmy týkající se signálů (1.1), především pak náhodných signálů (1.2). Zaměřil jsem se na nejdůležitější charakteristiky náhodných signálů (1.3), jako spektrální výkonovou hustotu (1.3.1) a autokorelační funkci (1.3.2), uvedl jsem ale i některé další (nejpoužívanější z momentů v kapitole 1.3.3). Nezbytné pro další práci bylo zadefinovat si šum (1.4) a vysvětlit, proč se barevně rozlišuje (1.4.1). Existuje sice oficiální standard, ale zdaleka se netýká všech barevných šumů (pouze bílého, růžového, modrého, fialového, hnědého a černého). Lze se setkat ale i s mnoha jinými, jejichž popis je někdy obtížný právě kvůli absenci oficiální definice.

Zatímco v průběhu první kapitoly jsem pracoval zejména s českými knižními zdroji, případně českými elektronickými přednáškami, v druhé kapitole jsem naopak častěji využíval zahraniční (anglické) internetové zdroje. Kvalitní česká tištěná publikace podrobněji popisující jednotlivé barevné šumy totiž není příliš dostupná.

V druhé kapitole jsem se tedy zaměřil na všechny nejběžnější barevné šumy – je jich celkem devět. V audio technice se nejčastěji používá růžový šum (2.2) pro testování audio systémů. Společně s bílým šumem (2.1) má maskovací schopnost – dokáže překrýt okolní zvuky. Bílý šum lze navíc využít i v elektronické hudbě. Modrý šum má velký význam v ditheringu, který byl objasněn v kapitole 2.3. Obdobné využití může mít i fialový šum (2.7), který navíc díky velké energii na vyšších frekvencích dokáže překrýt vysokofrekvenční šumění v uších (tinnitus). Šedý šum (2.6) zase může mít význam v určení míry nedoslýchavosti lidí, jelikož kopíruje psychoakustickou křivku. Pro audio oblast může mít jistý význam i oranžový šum (2.8), který může být použit k naladění nástrojů.

Zbývající tři – černý šum (2.4), hnědý šum (2.5) a zelený šum (2.9) – takového významu v audio technice jako ty předchozí určitě nedosahují. Pro úplnost jsem je však také uvedl.

V třetí kapitole jsem se věnoval generování jednotlivých šumů (růžového, modrého, hnědého a fialového). Použil jsem tři různé způsoby, první byl generování pomocí funkce `dps.ColoredNoise`, kterou má v sobě zabudovaný matlab, dá se brát jako profesionální program (3.1). Druhá metoda byla generování pomocí násobení frekvenčních charakteristik, kde jsem násobil frekvenční charakteristiku příslušným modulovým spektrem daného šumu (3.2). Poslední metoda byla generování pomocí FIR filtru, kde jsem navrhnul filtr pro každý šum, přes který se přefiltroval bílý šum, a tudíž jsem dostal žádaný barevný šum (3.3). Podkapitolu (3.4) jsem věnoval porovnání vygenerovaných výsledků, kde jsem zjistil, že se nedá říct, která metoda je nejlepší pro generování barevných šumů, jsou si podobné.

LITERATURA

- [1] ŠEBESTA, V., SMÉKAL, Z. *Signály a soustavy. Přednášky*. Vyd. 1. V Brně: Vysoké učení technické, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2003. 145 s. ISBN 80-214-2434-6.
- [2] ČEPČIANSKY, G., VACULÍK M. *Spektrálna analýza digitálnych signálov*. 1. vyd. V Žiline: EDIS - vydavateľstvo ŽU, 2005. ISBN 80-8070-406-6.
- [3] UHLÍŘ, J., SOVKA, P. *Číslíkové zpracování signálů*. Vyd. 2. přeprac. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2002. ISBN 80-01-02613-2.
- [4] FORMÁNEK, J. *Měřicí technika: Zpracování měřeného signálu* [online]. [cit. 2016-03-12]. Elektronická přednáška. Plzeň: Fakulta strojní, Západočeská univerzita v Plzni, 2007. Dostupné z: <http://home.zcu.cz/~formanek/VYUKA/Data1/MT/obecne-prednasky/Zpracovanisignalu.pdf>.
- [5] TŮMA, J. *Zpracování signálů získaných z mechanických systémů užitím FFT*. Praha: Sdělovací technika, 1997. ISBN 80-901936-1-7.
- [6] ČADA, M. *Statistické vyhodnocování exp. dat: (Auto)korelační funkce* [online]. [cit. 2016-03-12]. Elektronická přednáška. Praha: Fyzikální ústav, Akademie věd ČR, 2015. Dostupné z: http://www.fzu.cz/~cada/Prednaska_4.pdf.
- [7] SEDLÁČEK, R. *Signálové procesory v praxi: korelační a autokorelační funkce* [online]. [cit. 2016-03-12]. Elektronická přednáška. Praha: Fakulta elektrotechniky, České vysoké učení technické v Praze, 2010. Dostupné z: http://measure.feld.cvut.cz/system/files/files/cs/vyuka/predmety/A0M38SPP/slides/A0M38SPP_Prednaska_7.pdf
- [8] VLK, M. *Charakteristiky stochastických procesů zatížení, namáhání a kmitání* [online]. [cit. 2016-03-12]. Elektronické skriptum. Brno: Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně. Dostupné z: http://www.umt.fme.vutbr.cz/img/fckeditor/file/charakteristiky_SP.pdf.
- [9] Rane corporation. *Pro Audio Reference N* [online]. Mukilteo (USA) [cit. 2016-03-12]. Dostupné z: <http://www.rane.com/par-n.html>.
- [10] ELLIS, D. *About Colored Noise* [online]. [cit. 2016-03-12]. New York (USA): Fakulta elektrotechniky, Kolumbijská univerzita v New Yorku. Dostupné z: <http://www.ee.columbia.edu/~dpwe/noise/>.
- [11] DOWNEY, A.B. *Think Complexity: Chapter 9 Self-organized criticality* [online]. [cit. 2016-03-12]. Dostupné z: <http://greenteapress.com/complexity/html/thinkcomplexity010.html#toc57>.
- [12] Media College.com. *Noise Colours & Types* [online]. [cit. 2016-03-12]. Dostupné z: <http://www.mediacollege.com/audio/noise/>.
- [13] GEERE, D. *White, pink, blue and violet: The colours of noise* [online]. 2011 [cit. 2016-03-12]. Dostupné z: <http://www.wired.co.uk/news/archive/2011-04/7/colours-of-noise/page/1>.
- [14] CASTRO, J. *What Is Pink Noise?* [online]. 2013 [cit. 2016-03-12]. Dostupné z: <http://www.livescience.com/38464-what-is-pink-noise.html>.
- [15] TŮMA, J. *Složité systémy řízení*. 1. vyd. Ostrava: VŠB-Technická univerzita, 1998. ISBN 80-7078-534-9.

- [16] ZAVŘEL, R. *Noise: Odfiltrujte okolní zvuky a plně se soustředte na práci* [online]. 2012 [cit. 2016-03-12]. Dostupné z: <https://www.letemsvetemapple.com/2012/02/15/noise-odfiltrujte-okolni-zvuky-a-plne-se-soustredte-na-praci/>.
- [17] Elektronovinky.cz. *Generátor růžového šumu* [online]. 2012 [cit. 2016-03-12]. Dostupné z: <http://www.elektronovinky.cz/konstrukce/generator-ruzoveho-sumu>.
- [18] CASTRO, J. *What Is Blue Noise?* [online]. 2013 [cit. 2016-03-12]. Dostupné z: <http://www.livescience.com/38583-what-is-blue-noise.html>.
- [19] KREJSA, J. *Základy zpracování signálu: Digitalizace* [online]. [cit. 2016-03-12]. Elektronická přednáška. Brno: Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně. Dostupné z: <http://www.umt.fme.vutbr.cz/~ruja/vyuka/ZZS/DSP03.pdf>.
- [20] DE GOES, F., BREEDEN, K., OSTROMOUKHOV, V., DESBRUN, M. *Blue Noise through Optimal Transport* [online]. [cit. 2016-03-12]. Dostupné z: <https://graphics.stanford.edu/~kbreeden/pub/dGBOD12.pdf>.
- [21] Webexhibits.org. *Color effects near the speed of light: Cerenkov radiation* [online]. [cit. 2016-03-12]. Dostupné z: <http://www.webexhibits.org/causesofcolor/4BA.html>.
- [22] Techopedia.com. *Violet Noise* [online]. [cit. 2016-03-12]. Dostupné z: <https://www.techopedia.com/definition/27897/violet-noise>.
- [23] MathWorks. *Parks-McClellan optimal FIR filter design*. [online]. [cit. 2016-04-24]. Dostupné z: <http://www.mathworks.com/help/signal/ref/firpm.html?searchHighlight=firpm>.
- [24] Kinematika. *Decibelové veličiny v akustice, kmitočtová pásma*. [online]. [cit. 2016-04-25]. Dostupné z: http://ufmi.ft.utb.cz/texty/env_fyzika/EF_03.pdf.

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

f	Frekvence.
ω	Úhlová frekvence.
$S(\omega)$	Spektrální funkce.
$S_{xx}(\omega)$	Spektrální výkonová hustota.
$G(\omega)$	Jednostranná spektrální výkonová hustota.
$R_{xx}(\tau)$	Autokorelační funkce.
$F(x,t)$	Distribuční funkce.
$f(x,t)$	Hustota rozdělení pravděpodobnosti.
$a(t)$	Střední hodnota.
$D(t)$	Rozptyl (disperze).
$\delta(\tau)$	Diracova funkce.
PSD	Power Spectrum Density, spektrální výkonová hustota.
ff	Střední kmitočtyřetinooktávových pásem
fl	Spodní kmitočtyřetinooktávových pásem
fu	Horní kmitočtyřetinooktávových pásem

SEZNAM PŘÍLOH

Obsah CD

- Elektronická verze bakalářské práce
- Zdrojový kód